

Petteri Laukkanen

Teatterin äänijärjestelmä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Esitys- ja teatteritekniikan medianomi

Esittävä taide

Opinnäytetyö

Päivämäärä

Tekijät Otsikko	Petteri Laukkanen Teatterin äänijärjestelmä
Sivumäärä Aika	46 sivua + 2 liitettä 22.5.2013
Tutkinto	Esitys- ja teatteritekniikan medianomi
Koulutusohjelma	Esittävän taiteen koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Esitys- ja teatteritekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaajat	Lehtori Jyrki Sinisalo Tekninen johtaja Tomi Tirranen
<p>Tämä opinnäytetyö esittelee teatterin äänijärjestelmää ja sen käyttöä monissa muodoissaan. Teatterilla tarkoitetaan tässä työssä kaikkia esittävän taiteen näyttämöitä kuten oopperataloja, konserttisaleja, monitoimitiloja tai luentosaleja.</p> <p>Yleisesti käytettävät äänitekniset tuotantotavat ja -laitteet sekä niiden toimintaperiaatteet pyritään kuvaamaan kattavasti. Joitain osa-alueita, kuten kaiuttimien ja mikrofoniin toimintaa, käsitellään perusteellisemmin kuin muita, koska niiden on katsottu olevan erityisen oleellisia kaikissa teatteriäänitekniikan sovelluksissa.</p> <p>Äänilaitteiden käyttöä sekä teatterin äänijärjestelmän ongelmatilanteita ja niiden ratkaisuja pyritään kuvaamaan esimerkkien kautta ja näistä yleisimpiä selitetään varsin yksityiskohtaisesti.</p> <p>Teatteria tarkastellaan myös ääniteknisenä toimintaympäristönä. Teatterihistoriaa, akustiikkaa, sähkötekniikkaa ja aaltoliikkeen fysiikan ilmiöitä käsitellään siinä määrin kuin teatteriaänentoiston ymmärtämiseksi on katsottu olevan tarpeellista.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa riittävät tiedot teatterin äänijärjestelmästä sen toiminnan ymmärtämiseksi sekä aloitteleville ääniteknikoille että esittävän taiteen alalla toimiville, äänitekniikkaa vain pintapuolisesti tunteville henkilöille kuten taiteilijoille, hallinnon toimihenkilöille ja muiden teknisten osastojen työntekijöille.</p>	
Avainsanat	Ääni, äänitekniikka, teatteritekniikka, esitystekniikka

Author Title	Petteri Laukkanen The Theatre Sound System
Number of Pages Date	46 pages + 2 appendices 22 May 2013
Degree	Bachelor of Arts
Degree Programme	Performance Technology
Specialisation option	Performance and Theater Technology
Instructors	Mr. Jyrki Sinisalo, Project Manager Mr. Tomi Tirranen, Principal Lecturer
<p>This thesis discusses the theatre sound system and its many forms of use. The word theatre comprises here all kinds of venues for performing arts from opera houses to concert halls, community centres or auditoriums.</p> <p>All the common production techniques and equipment and their operational principles are explained thoroughly. Some fields of technology like functionality of speakers and microphones are explored more precisely than others because they are regarded as an absolutely essential part of any theatre sound application.</p> <p>The use of sound equipment as well as different kinds of sound technology related problems and their corresponding practical solutions are presented by providing examples, out of which the most common ones are described in great detail.</p> <p>The theatre is also examined as a sound technological operational environment. Theatre history, acoustics, electronics and wave physics are addressed to the extent necessary for understanding theatre sound.</p> <p>The aim of this study is to provide sufficient knowledge for beginning sound technicians and people working in other fields of theatrical expertise to be able to understand the functionality of the theatre sound system.</p>	
Keywords	Sound, sound technology, theatre technology, performance technology

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tuulikoneita ja alasimia – teatteriäänen historiaa	2
2.1	Teatterisalit ja amfiteatterit	2
2.2	Mekaaniset tehostelaitteet	2
2.3	Sähköinen äänitekniikka	3
3	Teatteri ääniteknisenä toimintaympäristönä	4
3.1	Akustiikka	4
3.1.1	Heijastumat	4
3.1.2	Jälkikaiunta	5
3.1.3	Äänen nopeus	6
3.2	Äänijärjestelmä teatterissa	6
3.2.1	Näyttämö	6
3.2.2	Katsomo	7
3.2.3	Muut tilat	7
3.3	Erilaiset tuotannot	7
4	Kaiutinjärjestelmät	7
4.1	Saliäänikaiuttimien tärkeät ominaisuudet	8
4.1.1	Taajuusvaste	8
4.1.2	Säteilykulma ja suuntaavuus	9
4.1.3	Herkkyys	10
4.1.4	Tehonkesto	10
4.1.5	Impedanssi	10
4.2	Pistesäteilijät ja linjasäteilijät	11
4.3	Kaiuttimet teatterissa	13
4.3.1	Pääkaiuttimet	13
4.3.2	Subwoofer-kaiuttimet	14
4.3.3	Viivekaiuttimet	14
4.3.4	Surround-kaiuttimet	14
4.3.5	Monitorikaiuttimet	14
4.4	Kaiutinjärjestelmän kattavuus ja virittäminen	15
4.5	Kaiutinprosessorit	16
4.6	Sähköakustiikat	16
5	Äänipöydät ja äänen prosessointi	17

5.1	Äänipöydät käyttötarkoituksen mukaan	17
5.1.1	Saliäänipöydät	17
5.1.2	Monitoriäänipöydät	17
5.1.3	Studioäänipöydät	18
5.2	Digitaalisten ja analogisten äänipöytien vertailua	18
5.3	Äänipöytien toiminta	18
5.3.1	Signaalitie	19
5.3.2	Sisääntulokanavat	20
5.3.3	Lähtökanavat	21
5.3.4	VCA-ryhmät	21
5.3.5	Kaiutus ja efektointi	22
6	Mikrofonit	23
6.1	Sähköinen toimintaperiaate	24
6.1.1	Dynaamiset mikrofonit	24
6.1.2	Kondensaattorimikrofonit	25
6.1.3	Elektreettimikrofonit	26
6.1.4	Pietsomikrofonit	26
6.1.5	Hiilimikrofonit	26
6.2	Mikrofonien suuntakuviot	26
6.2.1	Pallokuvioiset eli omnidirektionaaliset mikrofonit	26
6.2.2	Herttakuvioiset eli kardiodimikrofonit	27
6.2.3	Super- ja hyperherttakuvioiset eli super- ja hyperkardiodimikrofonit	28
6.2.4	Kahdeksikkokuvioiset mikrofonit	28
6.3	Proximity-efekti	29
6.4	Tuulisuojat ja pop-filtterit	30
6.5	Langattomat mikrofonit	30
6.5.1	Langattomat mikrofonijärjestelmät	31
6.5.2	Nappi- , panta- ja käsimikrofonit	32
6.5.3	Ongelmakohdat	32
7	Digitaaliääni ja sen rajapinnat	33
7.1	Pulssikoodimodulaatio	33
7.1.1	A/D- ja D/A-muunnos	33
7.1.2	Näytteenottotaajuus ja resoluutio	33
7.2	Virheenkorjaus	35
7.3	Pakkaaminen	35
7.4	Synkronointi	35
7.5	Digitaaliäänen rajapinnat	36

7.6	Äänen siirto tietoverkoissa	36
8	Kaapelointi	36
8.1	Mikrofoni- ja linjakaapelit	36
8.2	Häiriöt ja niiden välttäminen	37
8.2.1	Indusoituvat häiriöt	37
8.2.2	Maadoitusperäiset häiriöt	38
8.3	Audiosignaalin jako- ja sovituslaitteet	39
8.3.1	DI-boksi	39
8.3.2	Signaalimuuntaja	40
8.3.3	Jakovahvistin	40
8.4	Kaiutinkaapelit	41
8.5	Data- ja videokaapelit	41
8.6	Induktiosilmukat ja muut avustetut kuuntelut	41
8.7	Liitintyytit	42
9	Äänen tallentaminen ja toistaminen	43
9.1	Äänen tallentaminen ja muokkaaminen	43
9.2	Tallennetun äänen toisto	44
9.3	Tekijänoikeudet	45
10	Komentojärjestelmät	45
10.1	Radiopuhelimet	45
10.2	Merkkivalot	46
10.3	Sähköiset komentojärjestelmät (intercom system)	47
11	Lopuksi	49
	Lähteet	50
	Liitteet	
	Liite 1. Suomen Kansallisoopperan päänäyttämön pohjakuva	
	Liite 2. Liitintyytit	

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on koota yhteen mahdollisimman kattavasti kaikkein tärkein tieto teatterin äänijärjestelmästä. Aiheesta on valitettavasti tarjolla hyvin vähän kirjallisuutta – suomenkielistä ei tietoni mukaan ollenkaan. Suuri osa alan osaamisesta elää yhä ainoastaan hiljaisena tietona teatteriäänien tekijöiden mielessä. Muutamia englanninkielisiä konserttiäänitekniikan ja studioäänittämisen oppaita on olemassa, mutta niissäkään ei tarkastella teatterin äänijärjestelmää laajana kokonaisuutena. Tässä työssä on käytetty lähteenä mm. John A Leonardin kirjaa *Theatre sound*, äänilaittevalmistaja Yamahan julkaisemaa *Sound Reinforcement Handbookia* sekä Jukka Laaksosen mainiota *Äänityön kivijalka* -opasta. Paitsi kirjallisiin lähteisiin, perustan tietoni kahden vuosikymmenen työkokemukseeni teatterin, oopperan, baletin, musiikkiäänittämisen, äänentoiston ja jälkituotannon parissa sekä opintoihini Helsingin teknillisessä oppilaitoksessa, Metropoliassa ja Sibelius-Akatemiassa.

Teatterilla tarkoitetaan tässä työssä kaikkia esittävän taiteen näyttämöitä kuten oopperataloja, konserttisaleja, monitoimitiloja tai luentosaleja. Kaikissa näissä pätevät samat lainalaisuudet ja voidaan käyttää enimmäkseen samankaltaisia teknisiä laitteita.

Teattereissa yleisesti käytettävät tuotantotavat ja laitteet on pyritty kuvaamaan niin kattavasti kuin mahdollista sekä teorian että käytön kannalta. Työn jäsentelyssä on kuitenkin pyritty korostamaan käytännöllisyyttä siten, että teoreettinen tarkastelu on aina yhdistetty johonkin käyttötilanteeseen. Tällä on tavoiteltu ymmärrettävyyden lisäksi sitä, että työtä olisi mahdollista paitsi lukea kokonaisuutena alusta loppuun, myös käyttää käsikirjan tapaan vain yksi luku kerrallaan. Joitain osa-alueita, kuten kaiuttimien ja mikrofونien toimintaa, käsitellään perusteellisemmin kuin muita, koska niiden on katsottu olevan erityisen oleellisia kaikissa teatteriäänitekniikan sovelluksissa.

Tarkoituksena on tuottaa riittävät tiedot teatterin äänijärjestelmästä sen toiminnan ymmärtämiseksi sekä aloitteleville ääniteknikoille että esittävän taiteen alalla toimiville tai sitä opiskeleville, äänitekniikkaa jonkin verran tunteville henkilöille, kuten taiteilijoille, hallinnon toimihenkilöille ja muiden teknisten osastojen työntekijöille. Myös äänitekniikan ammattilaiset voivat kenties löytää opinnäytetyöstäni uusia näkökulmia omaan työhönsä.

2 Tuulikoneita ja alasimia – teatteriäänen historiaa

Ennen mikrofonin tuloa markkinoille 1920- ja magnetofonin 1930-luvulla ei sähköistä äänitekniikkaa ollut käytettävissä teattereissa eikä juuri missään muuallakaan. 1900-luvun alun ääni-ilmaisun keinot eivät juuri eronneet antiikin teattereissa käytetyistä. Se ei kuitenkaan tarkoita, etteikö niitä olisi ollut.

2.1 Teatterisalit ja amfiteatterit

Puheäänen ja esitetyn musiikin selkeyteen ja sointiin on pystytty menestyksellisesti vaikuttamaan esityspaikan akustiikalla koko esittävän taiteen historian ajan. Antiikin Kreikassa osattiin suunnitella ja rakentaa amfiteattereita, joissa tuhannet ihmiset pysyivät seuraamaan esityksiä ilman sähköistä vahvistusta.



Kuvio 1. Epidauroksen teatteri. Kreikka n. 300 e.a.a. (www.greatbuildings.com)

2.2 Mekaaniset tehostelaitteet

Äänitehosteita on tehty mekaanisin välinein teattereissa jo satojen vuosien ajan. Jotkut menetelmistä ovat yhä käytössä, ja esimerkiksi tuulikone ja thunderplate elävät yhä orkestereiden lyömäsoittajien soittimina.



Kuvio 2. Tuulikone (www.mnartists.com)

Monissa klassisissa sävellyksissä – erityisesti oopperoissa – on partituuriin kirjoitettuna mekaanisin välinein tuotettuja äänitehosteita, kuten tuulikoneella tehtyä tuulen suhinaa, flyygelin kantta pudottelemalla luotua ukkosen jyrinää tai bassorummulla imitoituja tykinlaukauksia. Wagner tavoitteli surround-vaikutelmaa Reininkulta-oopperansa Nibelheim-kohtaukseen, johon hän sävelsi rytmisen osan 18 alanimelle, joita niinkään 18 lyömäsoittajaa soittaisi ympäri katsomoa ja näyttämöä.

2.3 Sähköinen äänitekniikka

Äänen tallennus ja prosessointi on kehittynyt viime vuosikymmeninä valtavasti. Toisaalta aaltoliikkeen fysiikka ja sähkömekaniikan lainalaisuudet ja niiden mukana mikrofoni- ja kaiuttimien toimintaperiaatteet ovat säilyneet muuttumattomina. Niinpä nykyajan äänitekniikka onkin kiehtova yhdistelmä uutta ja vanhaa, luonnonlakeja ja mielikuvituskellista innovaatiota.

3 Teatteri ääniteknisenä toimintaympäristönä

Teatterin äänijärjestelmän käyttötarkoituksen voi mielestäni hyvin karkeasti pelkistää kahteen pääkohtaan: illuusion luominen ja informaation välittäminen.

Illuusio 1 Harhakuva, kuvitelma; pettävä todellisuusvaikutelma 2 psyk. Näköharha 3 Haave, turha toive, pilvilinna (Nurmi, Rekiaro & Rekiaro. 1994).

Teatteriesityksessä pyritään luomaan illuusio paikasta, ajasta tai tunnetilasta. Konsertissa pyritään tietyn musiikkityylin tai yksittäisen työryhmän edellyttämään sointiin. Samaan aikaan tarvitaan yleensä puheselkeyttä helpottamaan dialogin seuraamista katsomossa, tai vaikkapa esityksen äänen toistamista pukuhuoneissa.

Nämä ja lukemattomat muut vastaavat päämäärät ovat ilman ääniteknikan apua toivotomassa ristiriidassa keskenään.

3.1 Akustiikka

Täysin vapaassa kentässä ääni etenee tasaisesti kaikkiin suuntiin. Tällaisia tiloja ei laboratorio-olosuhteita lukuun ottamatta ole olemassakaan. Käytännössä kaikissa tiloissa akustiset ilmiöt vaikuttavat ääneen. Tässä luvussa esitellään niistä muutamia oleellisimpia.

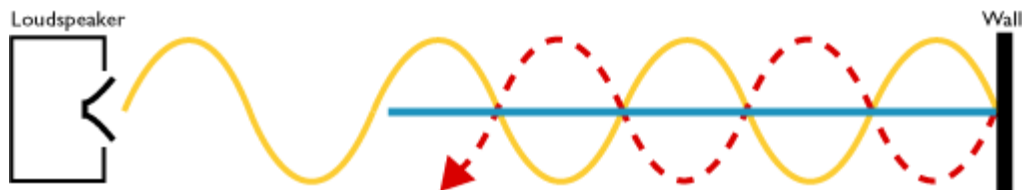
3.1.1 Heijastumat

Eritaajuiset äänet heijastuvat erilaisista pinnoista eri voimakkuudella ja jopa eri suuntiin. Esimerkiksi kiviseinän peittävä ohut kangasverho saattaa pysäyttää korkeataajuiset äänet lähes täysin, kun taas matalat äänet heijastuvat verhotusta kiviseinästä kuin mitään verhoa ei olisikaan. Näin ollen tila, jossa ääntä tuotetaan ja kuunnellaan, vaikuttaa oleellisesti äänen sointiin. Kuvatulla tavalla verhoillussa huoneessa matalat taajuuDET korostuvat korkeiden äänten vaimentuessa. Lisäksi heijastuneet – yleensä matalataajuiset – äänet summautuvat alkuperäiseen. Jos alkuperäinen ja heijastunut ääni ovat samassa vaiheessa eli värähtelevät samanaikaisesti samalla taajuudella keskenään, korostuvat kyseiset äänet suhteessa muihin. Vastavaiheessa olevat äänet puolestaan vaimenevat muita enemmän.

Jos äänen aallonpituus tai sen monikerta on sama kuin huoneen joidenkin pintojen välinen etäisyys, voi syntyä seisovaksi aalloksi kutsuttu ilmiö, jolla tarkoitetaan huoneessa resonoivaa ääniaaltoa. Seisovan aallon voi kuulla vaikkapa tyhjässä huoneistossa pidettävässä asuntoesittelyssä. Äänentoiston kannalta seisovat aallot ovat erittäin epätoivottavia, koska niiden aiheuttamat korostumat ja vaimenemat ovat erittäin voimakkaita.

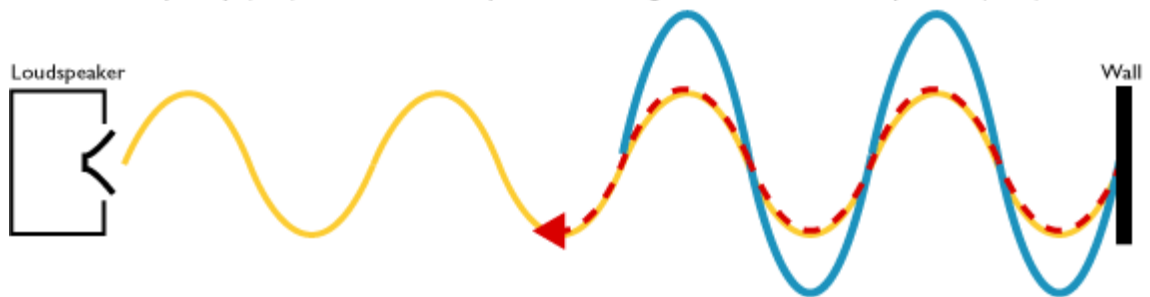
Room modes. Standing waves out-of-phase cancellation.

Reflected frequency (red) reflects back out-of phase, resulting in cancellation (blue).



Room modes. Standing waves combine in-phase.

Reflected frequency (red) reflects back in-phase, resulting in an increase in amplitude (blue).



Kuvio 3. Seisova aalto vaiheessa (alla) ja vastavaiheessa (yllä) (www.planetoftunes.com)

3.1.2 Jälkikaiunta

Kun ääni heijastuu riittävän monta kertaa eri pinnoista ja palaa taas viivästyneenä takaisin huoneeseen, syntyy moninkertaisten heijasteiden ja niistä aiheutuvien viiveiden muodostama hajallinen (diffuusi) äänikenttä eli jälkikaiunta (Laaksonen 2006, 18).

Akustista musiikkia esitettäessä on toiveena yleensä melko pitkä jälkikaiunta. Esimerkiksi Wienissä sijaitsevan maailman maineikkaimpiin konserttisaleihin kuuluvan Musikkverein-salin jälkikaiunta-aika on 1 kHz taajuudella noin 2,2 sekuntia. Puheen selkeyttä jälkikaiunta taas heikentää. Toisaalta illuusion luomisen kannalta tilanne voi olla päinvastainen. Esimerkiksi papin puhe kirkossa assosioituu ilman muuta monen sekunnin

jälkikaiuntaan. Jos siis halutaan luoda mielikuva kirkossa puhuvasta papista, on pappia esittävän henkilön puhe selkeydenkin uhalla kaiutettava.

3.1.3 Äänen nopeus

Äänen melko rajallinen nopeus – 344 metriä sekunnissa normaalissa lämpötilassa ja ilmanpaineessa – asettaa haasteita sekä musiikin esittämisen yhtäaikaaisuudelle että äänijärjestelmän toteutukselle. Esimerkiksi Suomen Kansallisoopperan päänäyttämön pohjakuvasta (Liite 1) nähdään, että sivu- tai takanäyttämöllä oleva muusikko saattaa kuulla orkesterimontusta tulevan äänen ilman sähköistä monitorointia lähes 0,1 sekunnin viiveellä.

3.2 Äänijärjestelmä teatterissa

Teatterin äänijärjestelmän osat ja niiden käyttö ovat pääpiirteiltään vakiintuneet seuraavan kaltaisiksi.

3.2.1 Näyttämö

Näyttämöllä ja siihen liittyvissä tiloissa kuten orkesterimontussa tuotetaan akustista ääntä, jonka toistamiseen tarvitaan mikrofoneja sekä sähköistä ääntä syntetisaattoreilla, tietokoneilla, sampleilla ym. laitteilla.

Lisäksi näyttämöllä ääntä tuottaville henkilöille tarvitaan yleensä akustisen äänen lisäksi sähköistä monitoriääntä, jotta he voivat esiintyä synkronissa toistensa kanssa. Monitoriääni on erillinen miksaus esityksen eri äänilähteistä. Eri esiintyjille tehdään tarvittaessa omat monitorimiksausukset. Tyypillisesti esimerkiksi laulajan on tarpeen kuulla selkeästi oman äänensä lisäksi säestyksen rytmin ja harmonian kannalta tärkeimmät osat. Monitorimiksauksessa pyritään yleensä enemmän selkeyteen kuin miellyttävään sointiin. Monitoriäänen miksaus tehdään suuremmissa musiikkituotannoissa yleensä sivunäyttämöltä käsin pelkästään tähän tarkoitukseen varatulla äänipöydällä.

3.2.2 Katsomo

Katsomossa on äänijärjestelmän tärkein kuulijakunta eli katsojat. Heitä varten salissa on yleensä pääkaiutinjärjestelmä sekä mahdollisesti surround-kaiuttimia.

Katsomossa sijaitsee – tai ainakin ehdottomasti pitäisi sijaita – myös saliaäänimiksaajan työpiste, mistä käsin hän kontrolloi saliaäänijärjestelmää siten, että yleisö kuulee illasta toiseen optimaalisen yhdistelmän akustista ja sähköisesti tuotettua ääntä.

3.2.3 Muut tilat

Lämpioissa tarvitaan puheäänentoisto yleisökuulutuksia varten. Usein niissä järjestetään myös konsertteja ja muita tilaisuuksia, joissa tarvitaan täydellinen äänentoistojärjestelmä. Pukuhuoneissa ja muissa henkilökuntatiloissa annetaan henkilökuntakuuluksia sekä seurataan esitysten ääntä. Harjoitussaleissa toistetaan musiikkia ja tehosteita.

Tarkkaamotiloissa ja mahdollisessa äänistudiossa on oltava mahdollisuus kuunnella ja taltioida ääntä vähintään näyttämöltä ja mieluiten myös muista tiloista kuten mahdollisista harjoitussaleista.

3.3 Erilaiset tuotannot

Teattereissa esitetään erilaisia toisistaan dramaattisestikin eroavia tuotantoja, kuten puheteatteria, oopperaa, balettia, musikaalia, konsertteja, gaaloja, yritystilaisuuksia, seminaareja, joilla on kullakin omat erityispiirteensä. Ääniteknisestä näkökulmasta on lohdullista, että niissä kaikissa käytetään samaa perusjärjestelmää. Myös työtavat ovat oleellisimmilta osiltaan samoja.

4 Kaiutinjärjestelmät

Kaiuttimet muuttavat sähköisen audiosignaalin ilmanpaineen vaihteluiksi ja toimivat linkkinä akustisen äänen ja sähköisen äänenkäsittelyn välillä. Voidaankin todeta, että

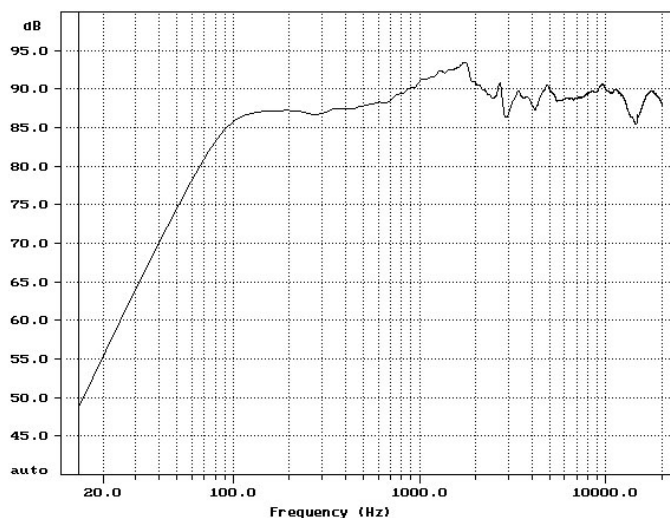
jos teatterin kaiutinjärjestelmä ei toimi tai toimii puutteellisesti, menettää sitä edeltävänkin äänitekniikan ja -suunnittelun laatu merkityksensä.

4.1 Saliäänikaiuttimien tärkeät ominaisuudet

4.1.1 Taajuusvaste

Taajuusvaste kuvastaa sitä kuinka voimakkaasti kaiutin toistaa erikorkuiset äänet. Ihanteellisen kaiuttimen taajuusvaste on suora viiva joka tarkoittaa, että mikään taajuus ei toistettaessa voimistu tai vaimennu. Tällaisia kaiuttimia ei luonnollisesti ole olemassa.

Ihmisen kuuloalueena pidetään yleisesti 20 Hz:n ja 20 kHz:n välistä taajuusaluetta. Eri ihmisten kuuloalueessa on kuitenkin yksittäisiä eroja, ja iän karttuessa kyky kuulla korkeimpia ääniä heikkenee. Myös liian pitkään jatkunut altistus voimakkaille voimakkaille äänille aiheuttaa kuulon heikentymistä.



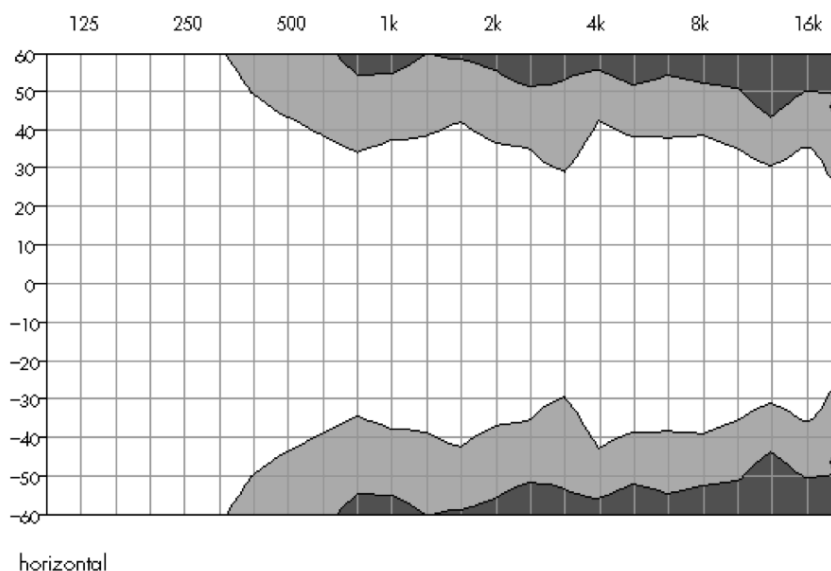
Kuvio 4. Tunnetun studioreferenssikaiutin Yamaha NS-10:n taajuusvaste (www.soundonsound.com)

Lisäksi on hyvä huomioida, että sen tilan akustiikka, jossa kaiutin soi, vaikuttaa merkittävästi järjestelmän lopulliseen, kuulijalle välittyvään taajuusvasteeseen.

4.1.2 Säteilykulma ja suuntaavuus

Säteilykulma on se avaruuskulma, jossa kaiuttimen säteilemä ääni on vaimentunut enintään 6 dB suoraan eteenpäin säteiltävään ääneen verrattuna. (Haaranen, Holm, Joenpolvi, Kuusisto, Leskinen, Lähteenmäki, Paukku, Ristilä, Karppinen. 2004, 110)

Säteilykulma ilmoitetaan asteina vaaka- ja pystysuunnassa. Säteilykulma on voimakkaasti taajuudesta riippuvainen, vaikeivät kaiutinvalmistajat sitä erityisesti markkinoinnissaan korostakaan. Toisin sanoen kaiuttimien esitteissä mainitut nimelliset kulmat ovat täsmällisesti tosia vain verrattain korkeilla taajuuksilla. Matalimmilla taajuuksilla yksittäiset kaiuttimet ovat käytännössä omnidirektionaalisia, eli eivät suuntaa ääntä. Ammattilaitteiden valmistajat tarjoavat säteilykulmista myös täsmällistä tietoa taajuuden funktiona.



Kuvio 5. D&B-merkkisen C7-kaiuttimen horintaalisäteilykulma eri taajuuksilla. Kuvasta nähdään, että kulma on melko vakio n. 700-800 Hz suuremmilla taajuuksilla. Tätä matalammilla äänillä suuntaamista ei juuri tapahdu. (<http://www.dbaudio.com>)

Suuntaavuus taas on luku (Q-arvo), joka kuvaa suoraan kaiuttimen eteen tuotetun ja muihin suuntiin tuotetun äänen suhdetta.

Koska useimmissa käyttöympäristöissä – ei vähiten teattereissa, puhumattakaan monitoimisaleista, urheiluhalleista ym. – kamppaillaan huoneakustiikan aiheuttamia äänen vääristymiä vastaan, on kaiuttimien säteilykulman huomioiminen erittäin tärkeää. Kaiut-

timien sopivilla säteilykulmilla pyritään suuntaamaan niistä tuleva ääni siten, että mahdollisimman suuri osa äänestä kohdistuisi halutulle alueelle eli kuulijoihin ja vastaavasti mahdollisimman pieni osa äänestä kohdistuisi sellaisille alueille missä sitä ei tarvita, kuten seinä- ja kattopinnoille. Näin saadaan maksimoitua hyödyllisen ja kontrolloitavissa olevan suoran äänen suhde äänentoistolle yleensä haitalliseen kontrolloimattomaan huonetilasta heijastuneeseen ääneen.

4.1.3 Herkkyys

Herkkyydellä tarkoitetaan kaiuttimen tuottamaa äänenpainetta suhteessa sille syötetyn sähköisen tehon suhteen. Herkkyys ilmoitetaan äänenpaineena yhden watin teholla metrin päässä kaiuttimesta mitattuna. Mitä herkempi kaiutin, sitä suurempi äänenpaine samalla teholla.

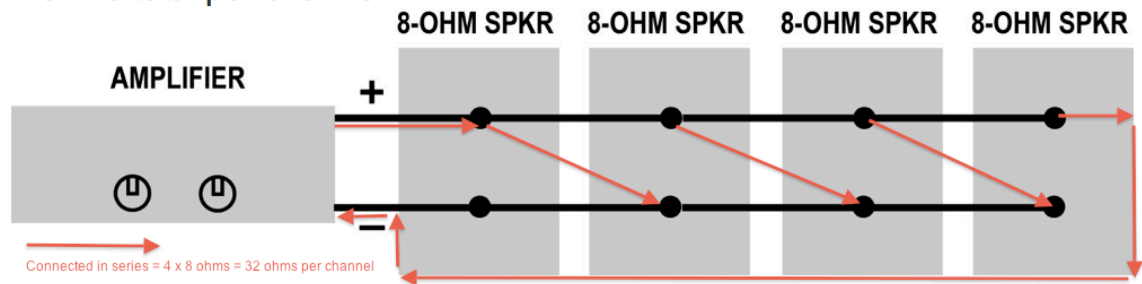
4.1.4 Tehonkesto

Tehonkestolla tarkoitetaan suurinta sähkötehoa, jolla kaiutinta voidaan käyttää. Ammattikäyttöön tarkoitettujen kaiuttimien valmistajat antavat tarkat ohjeet omille tuotteilleen sopivista vahvistimista tai jopa valmistavat itse juuri tietyille kaiuttimille tarkoitettuja vahvistimien ja prosessoreiden yhdistelmiä, jolloin käyttäjän ei juuri tarvitse huolehtia kaiuttimien ja vahvistimien yhteensopivuudesta eikä tehonkestosta.

4.1.5 Impedanssi

Kaiuttimen impedanssi määrittää sähkövirran voimakkuuden kullakin päätevahvistimen kaiuttimelle syöttämällä jännitteellä. Liian pieni impedanssi aiheuttaa liian suuren virran, joka voi rikkoa kaiuttimen tai vahvistimen. Mitä useampi kaiutin kytketään rinnan samaan päätevahvistinkanavaan, sitä pienempi impedanssi ja vastaavasti suurempi virta. Kun useampia kaiuttimia ketjutetaan normaaleilla speakon-kaapeleilla, kytkeytyvät kaiuttimet rinnan.

Four 8-ohm speakers in parallel per channel =
2 ohms total per channel



Kuvio 6. Neljän impedanssiltaan 8 ohmin rinnan kytketyn kaiuttimen kokonaisimpedanssi on vaivaiset 2 ohmia, mistä aiheutuu vastaavasti nelinkertainen virta vahvistimelle ja osaan kaapelointia. Punaiset nuolet taas kuvaavat samojen kaiuttimien rinnankytkentää, jolloin kaiuttimien kokonaisimpedanssi on 32 ohmia. Vastaavasti virta ja sen myötä teho on neljäsosa yksittäisen yhden kaiuttimen kahdeksan ohmin impedanssin aiheuttamaan verrattuna. (<http://www.crownaudio.com>)

Päätevahvistimessa tai sen käyttöohjeessa ilmoitetaan yleensä käytettävän kaiuttimen tai usean kaiuttimen yhdistelmän minimi-impedanssi. Tähän tulee suhtautua vakavasti.

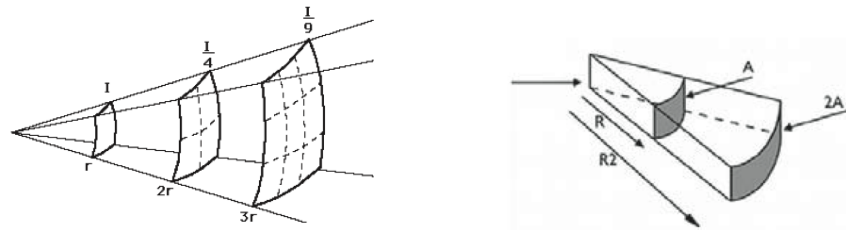
4.2 Pistesäteilijät ja linjasäteilijät

Pistemäisenä eli ympärisäteilevänä säteilijänä pidetään äänilähdettä, jonka koko on vähemmän kuin puolet toistettavasta aallonpituudesta. Yksinkertaisemmin ilmaistuna, mitä suurempi kaiutin, sitä matalampia ääniä se voi säteillä tiettyyn suuntaan. Esimerkiksi 40 Hz taajuisen äänen aallonpituus on $342/40 = 8,55$ metriä. Näin ollen 40 Hz äänen suuntaamiseen tarvittaisiin $8,55/2 = 4,28$ metrinen kaiutin. Koska mm. logistisista syistä kaiuttimista ei voida tehdä loputtoman suuria, on niiden suuntaavuus matalilla taajuuksilla varsin puutteellista.

Kun pistesäteilijöitä joilla kullakin toistetaan samaa signaalia samassa vaiheessa (eli täsmälleen synkronissa) kasataan päällekkäin suoraksi linjaksi, syntyy uusi yhtenäinen äänilähde – linjasäteilijä (engl. line array). Linjasäteilijä käyttäytyy matalilla taajuuksilla kuin yksi mitoiltaan linjan kokonaiskorkeutta vastaava kaiutin. Tämä mahdollistaa myös matalilla taajuuksilla kapean vertikaalisuuntaavuuden, josta on saliaänentoistossa suurta etua.

Periaatteessa mikä tahansa korkea pino kaiuttimia muodostaa linjasäteilijän kaltaisen elementin, mutta kaiuttimien olisi oltava melko pieniä ja lähellä toisiaan, jotta ne muo-

dostaisivat horisontaalisuunnassa akustisesti yhden kaiuttimen, eikä useita erillisiä äänilähteitä.



Kuvio 7. Pistemäinen (vas.) ja sylinterimäinen äänilähde (oik.) esim. linjasäteilijä (Haaranen ym. 2004, 141)

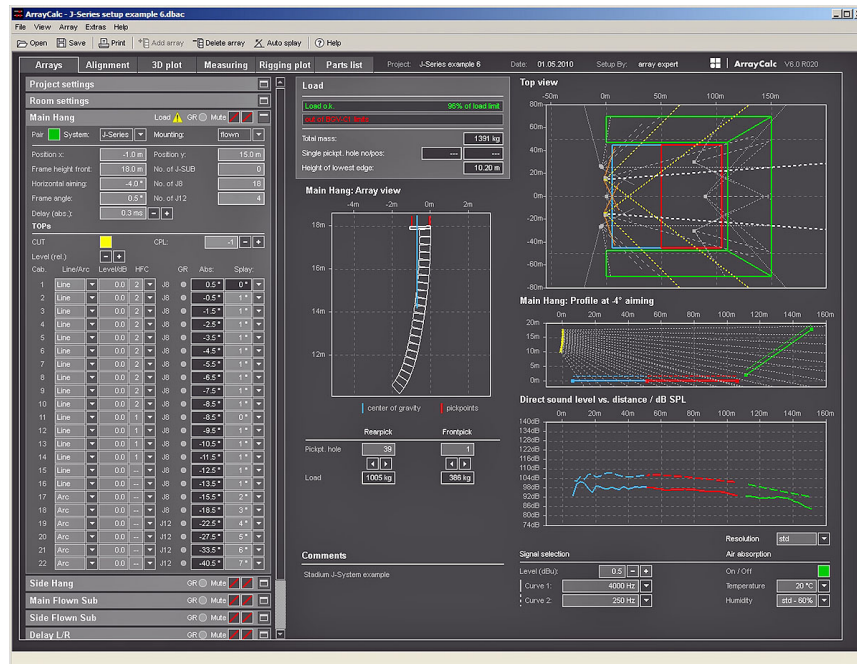
Kun kaiuttimen vertikaalisuuntakulma on erittäin pieni, vältetään katosta ja lattiasta tulevia heijastuksia. Lisäksi linjasäteilijän ääni vaimenee lähikentässä kuunteluetaisuuden kaksinkertaistuessa vain 3 dB, kun pistesäteilijällä vastaava vaimenema on 6 dB, mikä taas helpottaa mm. suuremman katsomon kattamista ilman viivekaiuttimia.

Täydellisen linjasäteilijän, joka suuntaisi matalimpiakin ääniä ja joka toimisi kaikilla etäisyyksillä, tulisi olla äärettömän pitkä. Käytännössä linjasäteilijän mitoitus riippuu käyttökohteesta: syvä katsomo edellyttää pitkää linjasäteilijää.

Yhteenvedona voidaan todeta, että linjasäteilijöillä voidaan laajan horisontaalisuuntakuvion (jopa yli 120 astetta) ja helposti muokattavan horisontaalisuuntakuvion ansiosta kattaa laajoja katsomoita ja hallita vaikeita akustisia olosuhteita ilman hajautettua kaiutinjärjestelmää. Lisäksi kaiuttimia voidaan tarpeen vaatiessa ripustaa päällekkäin rajoiton määrä järjestelmän ominaisuuksien siitä kärsimättä.

Linjasäteilijöiden huonona puolena voidaan pitää korkeaa hintaa suhteessa saavutettuun äänenpaineeseen. Tämä johtuu siitä, että pistesäteilijöissä keski- ja ylätaajuuksien tuottamiseen käytettävissä torvikaiuttimissa on parempi hyötysuhde kuin linjasäteilijöissä käytettävissä kartiokaiuttimissa. Nykyään tosin monet valmistajat käyttävät torvikaiuttimia myös linjasäteilijöissä.

Näiden seikkojen takia linjasäteilijöistä onkin tullut de facto -standardi suurten tilojen esitysäänentoistossa.



Kuvio 8. Ruutukaappaus kaiutINVALMISTAJA D&B:n Arraycalc-ohjelmasta (www.dbaudio.com)

Koska lähikentän pituus ja muut linjasäteilijöiden kriittiset ominaisuudet ovat riippuvaisia mm. kaiuttimien määrästä sekä ripustuskulmasta ja -korkeudesta kussakin tilassa, on kaiutINVALMISTAJILLA nykyään omat tietokoneohjelmansa niiden laskemiseksi.

4.3 Kaiuttimet teatterissa

Teatterissa tarvitaan saliaäänikaiuttimien lisäksi myös muita kaiuttimia, kuten studiomonitorreja ja palokuulutuslaitteita. Tässä työssä keskitytään kuitenkin saliaäänikaiuttimiin, koska ne ovat esitystoiminnassa erittäin tärkeässä osassa.

4.3.1 Pääkaiuttimet

Pääkaiuttimet sijaitsevat normaalisti näyttämöaukon yläpuolella tai sivuilla ja ne tuottavat pääasiassa teatterisalissa kuultavan sähköisen äänen. Pääkaiuttimet käytetään yleensä stereojärjestelmänä, jolloin kaiuttimet sijaitsevat näyttämön vasemmassa ja oikeassa reunassa. Lisäksi usein näyttämöaukon yläreunassa keskellä on kolmas kaiutinpositio, jota voidaan käyttää joko stereokannan osana täyttämässä mahdollista aukkoa suuntakuviassa stereokaiuttimien välillä tai itsenäisenä keskikanavana.

4.3.2 Subwoofer-kaiuttimet

Subwoofer-kaiuttimet ovat joko osa pääkaiutinjärjestelmää, jolloin niiden tehtävänä on laajentaa pääkaiuttimien taajuusvastetta sellaisille matalille taajuuksille, joita ei muuten voitaisi toistaa, tai erillinen efektikaiutinjärjestelmä, jota käytetään vain tiettyjen äänilähteiden kanssa ja syötetään esim. äänipöydän aux -lähdöstä.

4.3.3 Viivekaiuttimet

Viivekaiuttimia tarvitaan, jos pääkaiuttimet eivät etäisyyden aiheuttaman äänen väimeneman tai akustisen esteen takia kata jotain osaa katsomosta. Ne ovat tyypillisesti melko pienitehoisia kaiuttimia, jotka pyritään tuomaan lähelle kuulijoita. Viivekaiuttimilla toistettava ääni on viivästettävä niin, että se saavuttaa kuulijat synkronissa pääkaiuttimista tulevan äänen kanssa. Jos näyttämöltä kuuluva akustinen ääni on niin voimakas, että se kuuluu merkittävässä määrin vahvistetun äänen ohella, voi olla tarpeen viivastää sekä pää- että viivekaiuttimien signaalia suhteessa vahvistamattomaan ääneen. Usein viiveen voikin määritellä mittaamalla välimatkan kustakin kaiuttimesta näyttämön takaseinään.

4.3.4 Surround-kaiuttimet

Elokuvateattereita lukuun ottamatta esittävän taiteen saleissa ei juuri ole tarpeen käyttää 5.1- tai muita standardoituja surround-äänijärjestelmiä. Ne on kehitetty liikkuvan kuvan äänentoistoa varten. Sen sijaan monissa teatteriesityksissä käytetään erilaisten akustisten tilojen jäljittelyyn, tai joskus yksittäisten äänien ja jopa dialogin toistamiseen, kuhunkin tilaan suunniteltua surround-äänijärjestelmää. Näiden järjestelmien toteuttamista rajoittaa usein tuntuvasti katsomoiden visuaalinen ilme, johon eivät kaiuttimet välttämättä sovi.

4.3.5 Monitorikaiuttimet

Monitorikaiuttimia tarvitaan, jotta esiintyjät kuulevat yhtäläillä itsensä tuottamat ja muut esityksen äänet. Tunnetuin monitorikaiutintyyppi lienee lattialla makaava ns. kulma-monitori, jota käytetään erityisesti muusikkojen monitoreina. Teattereissa niiden käyttö ei ole kovin yleistä, koska ne eivät sovi näyttämökuvaan eivätkä esiintyjien jatkuvaan

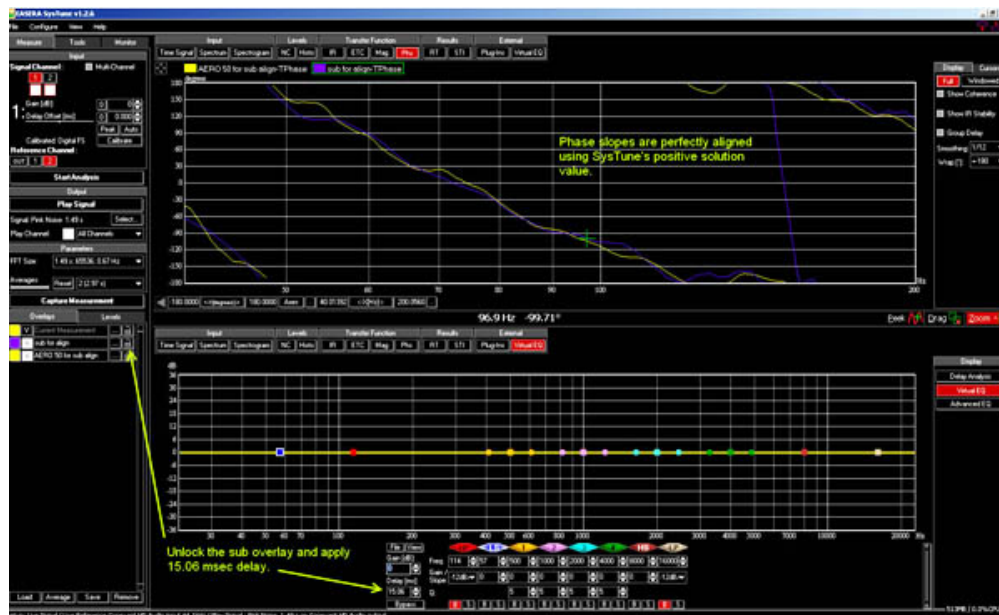
liikkumiseen. Sen sijaan teattereissa käytetään näyttämön sivuille tai yläpuolelle ripustettuja monitorikaiuttimia. Kaukana esiintyjistä olevien kaiuttimien ongelmana on se, että ne kuuluvat usein myös katsomoon. Katsomoon vuotava monitoriääni on laadultaan kehua, koska se on yleensä heijastumien vääristämää ja vaihevirheessä varsinaiseen saliaäneen nähden. Lisäksi monitorikaiuttimet on suunnattu esiintyjiin, joten katsomoon kuuluvasta äänestä puuttuvat korkeat äänet lähes täysin.

4.4 Kaiutinjärjestelmän kattavuus ja virittäminen

Laadukkainkaan kaiutinjärjestelmä ei lunasta sille asetettuja odotuksia, jollei sitä suunnata oikein ja säädetä – tai viritetä, kuten toimenpidettä on kentällä tapana nimittää – asianmukaisesti.

Jotta jokaiselle kuulijalle voidaan taata mahdollisimman yhtenäinen äänentoisto, on huolehdittava siitä, että riittävä määrä kaiuttimia sijoitetaan, suunnataan, viivästetään keskenään ja ekvalisoidaan oikealla tavalla. Tästä seuraavaa valtavaa määrää parametreja ei harjaantuneinkaan korva hallitse ilman apuvälineitä. Hyvä sointi on toki tunnistettavissa, mutta sen pala palalta rakentaminen on kokonaan toinen asia. Onneksi nykyaika on tuonut markkinoille apuvälineitä, kuten Smaart- ja Systune-tietokoneohjelmat. Näiden ohjelmien ideana on verrata kaiuttimelle syötettävää ja mitattua mikrofoniin tallennettua signaalia. Näiden ero taas kertoo ohjelman tekemän monimutkaisen laskennan jälkeen käyttäjälle tarvittavat tiedot järjestelmän vaihteistuksesta ja taajuusvasteesta ym.

Jos kaiuttimien paikka ja käyttötilanne on vakio, kuten teattereissa usein on laita, kannattaa harkita järjestelmän virittämisen teettämistä alihankintana. Ammattimainen lopputulos saavutetaan todennäköisesti oman mittalaitteiston hankintaa halvemmalla.



Kuvio 9. Vaihevastemittaus Systune-ohjelmalla (www.prosoundweb.com)

4.5 Kaiutinproessorit

Jotta mittaustulokset saadaan sovellettua käytäntöön, tarvitaan signaaliprosessointia, jolla voidaan tehdä tarvittavat korjaukset.



Kuvio 10. XTA 226 kaiutinproessori (www.xta.co.uk)

KaiutINVALMISTAJAT integroivat kuitenkin yhä useammin tarvittavan prosessoinnin pääte-vahvistimiin, joten erillisiä prosessoreita ei välttämättä enää tarvita.

4.6 Sähköakustiikat

Markkinoille on viime vuosina tullut muista kaiutinjärjestelmistä käyttötarkoitukseltaan poikkeavia erityisiä sähköakustiikkoja, jotka muodostuvat suuresta määrästä kaiuttimia ja mikrofoneja, jotka taas yhdistetään erityisellä prosessointijärjestelmällä. Sähköakustiikalla voidaan jäljitellä useita erilaisia saliakustiikkoja, ja ne mahdollistavatkin esim. kamarikonserttien järjestämisen saleissa, joissa ei luonnostaan ole kuin mitätön jälki-

kaiunta-aika. Tunnetuin keinoakustiikka on tätä kirjoitettaessa Meyer Soundin Constellation-järjestelmä. Sähköakustiikkojen käyttöä rajoittaa valitettavasti tähtitieteellinen hinta.

5 Äänipöydät ja äänen prosessointi

5.1 Äänipöydät käyttötarkoituksen mukaan

Äänipöydät tai arkikielellä mikserit, miksauspöydät, tiskit jne. ovat äänen muokkauksen hermokeskuksia, ja ne voidaan jakaa käyttötarkoituksen perusteella seuraaviin ryhmiin.

5.1.1 Saliäänipöydät

Saliäänipöydällä yhdistetään ja muokataan eri äänilähteistä tuotuja signaaleja, luodaan niiden välinen balanssi ja sointi sekä ohjataan muokattu ääni pääkaiuttimiin, surround-kaiuttimiin ja tarvittaessa monitoriäänipöydälle, tallennusvälineille ja muihin vaihteleviin kohteisiin.

Koska saliäänipöydällä tehdään illasta toiseen esityksen äänentoiston kannalta elintärkeitä ratkaisuja, on ehdottoman tärkeää, että se sijaitsee katsomossa niin hyvällä paikalla, että salimiksaaja kuulee esityksen samalla tavalla kuin suurin osa yleisöstä. Käytännössä tämä tarkoittaa permannon keskellä, josta usein tingitään permannon takaosan keskikohtaan, jotta vältetään aiheuttamasta kohtuutonta visuaalista haittaa äänipöydän takana istuville katsojille.

5.1.2 Monitoriäänipöydät

Monitoriäänipöydällä käsitellään samoista äänilähteistä haaroitettuja signaaleja kuin saliäänipöydälläkin, mutta muokattu ääni lähetetään saliäänijärjestelmän sijasta monitorikaiuttimille ja joissain tapauksissa monitorikuulokkeille (arkikielessä usein in-ear-monitorit). Monitorimiksauksen tarkoituksena on tuottaa taiteilijoille heidän tarvitsemansa ääni parhaan mahdollisen suorituksen mahdollistamiseksi. Tämä on erityisen tärkeää musiikki- ja tanssituotannoissa.

5.1.3 Studioäänipöydät

Studioäänipöydät alkavat olla erityisesti teattereissa harvinaisia, sillä äänittäminen tapahtuu tätä nykyä useimmiten erillisten mikrofonetuvahvistimien ja tietokonepohjaisen äänityöaseman, kuten Pro Toolsin, Logicin tai Pyramixin avulla, jolloin mikseriä ei välttämättä tarvita. Tähän on syynä kuvatun työprosessin sujuvuus ja kustannustehokkuus.

5.2 Digitaalisten ja analogisten äänipöytien vertailua

Digitaaliset äänipöydät ovat markkinoille tulostaan saakka olleet teattereissa erityisen suosittuja, koska ne ovat yleensä pienikokoisempia kuin vastaavat analogiäänipöydät ja sisältävät useimmat tarvittavat äänenmuokkauslaitteet, kuten dynamiikkaprosessorit ja kaikulaitteet, jolloin säästyy tilaa, kun erillisiä laiteräkkejä ei tarvita. Näin saadaan katsomoon enemmän myytäviä paikkoja, mikä on pitkällä aikavälillä merkittävä asia. Parhaimmillaan analogisen äänipöydän korvaaminen digitaalisella maksaa itsensä takaisin kohonneina lipputuloina.

Digitaalisten mikserien automaatiotoiminnot tekevät niistä houkuttelevia varsinkin repertuaariteattereissa, joissa on tarpeen esittää ja harjoitella useita eri esityksiä vuoropäivinä ja jopa saman päivän aikana.

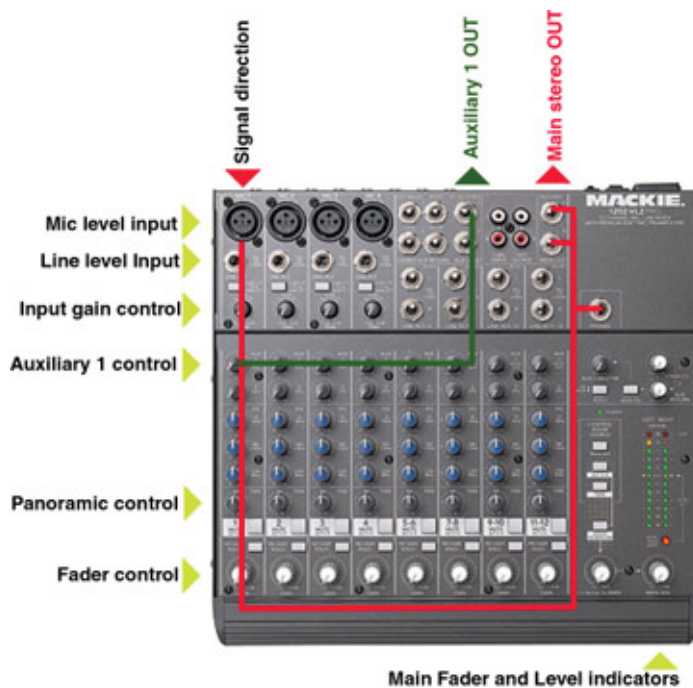
Digitaalimikserien ongelmana verrattuna analogimiksereihin on ollut tietty epäluotettavuus, mutta ainakin tärkeimmät ammattilaitteiden valmistajat näyttävät ratkaisseet suurimmat ongelmat. Esimerkkinä toimikoon Suomen Kansallisoopperan päänäyttämön digitaalinen Yamaha PM1D-saliäänipöytä, jota on käytetty lähes 15 vuoden ajan tuhansissa esityksissä ja harjoituksissa ilman vakavia ongelmia.

5.3 Äänipöytien toiminta

Eri valmistajien äänipöytien toimintatapa, kuten moni muukin äänitekninen ratkaisu, on muotoutunut vuosien varrella pääpiirteittäin vakioksi. Mikään virallinen standardi ei sido valmistajia, mutta tietyt asiat kuten signaalitie, on de facto kaikilla sama jopa siinä määrin, että digitaalimikserissä käytetään samaa logiikkaa, vaikka teknistä perustetta siihen ei välttämättä ole. Selvää on, että etenkin freelancer-käyttäjien kannalta eri mikserien käyttölogiikan samankaltaisuus on mainio asia.

5.3.1 Signaalitie

Kun mikrofoni- tai muu audiosignaali saapuu äänipöytään, on sen voimakkuus nostettava -20dBu - $+4\text{dBu}$ suuruusluokkaan, eli linjatasoiseksi. Tämä tapahtuu etuvahvistimella, joka on sisääntulokanavan ensimmäinen osa ja jonka vahvistusta säädetään gain-potentiometrillä. Koska mikrofoni- tai muu lähettämä signaali on heikko, luokkaa -60 dBu ja -40 dBu välillä, joudutaan signaalin jännite nostamaan mikrovolttitasolta välille $0,1\text{V}$ – 2V , eli jopa miljoonakertaiseksi alkuperäiseen nähden. (Ks. esim. Davies, Jones 1987) Tämän takia etuvahvistimen laatu ja oikea säätö on erittäin kriittinen osa äänentoistoketjua. Etuvahvistimen jälkeen tapahtuu digitaalimiksereissä analogi-digitaalimuunnos. Itse etuvahvistin on siis aina analoginen laite myös digitaalimiksereissä. Digitaalilaitteissa voi olla myös digitaalisia tuloja, mutta niitä käytettäessä etuvahvistin ohitetaan.



Kuvio 11. Äänipöydän toiminta pelkistettynä (<http://www.portlandmusiccompany.com/>)

Etuvahvistimen jälkeen signaali kulkee sisääntulokanavan ja siinä tapahtuvan prosessoinnin sekä tasonsäädön ja ryhmittelyn kautta erilaisille ulostulokanaville – kuten aux-, ryhmä-, tai päälähtöihin – johtaville väylille. Ulostulokanavilta signaali johdetaan eteenpäin vahvistimille, tallentimille ja muihin käyttökohteisiin.

5.3.2 Sisääntulokanavat

Äänipöydässä voi olla käyttötarpeen mukaan, vain muutama tai jopa satoja sisääntulokanavia (input). Koosta riippumatta kussakin ammattimikserin sisääntulokanavassa on seuraavat toiminnot:

- Etuvahvistin (preamp) ja sen säätö (gain) signaalin muuttamiseksi sopivalle voimakkuudelle.
- Vaiheenkääntö (phase), jolla signaalin vaiheistus voidaan kääntää 180 astetta. Käytetään vaihevirheen korjaamiseen tyypillisesti esim. virvelirummun alamikrofonissa, joka kuulee saman äänen kuin ylämikrofoni, mutta 180 asteen vaihevirheellä – kun alakalvo värähdellessään lähestyy alamikrofonia, etääntyy yläkalvo vastaavasti ylämikrofonista.
- Ylipäästösuodin (high pass filter), jolla voidaan leikata signaalista ei-toivotut matalat taajuudet pois.
- Inserttipiste, joka tarkoittaa yleensä yhdellä stereojakilla toteutettua balansoimattonta liitäntää, johon voidaan kytkeä lisälaitteita, yleensä dynamiikkaprosesoreita.
- Taajuuskorjain (EQ, equalizer) signaalin taajuussisällön muokkaamiseen.
- Aux-lähtöjä (auxiliary send), joilla signaalia voidaan jakaa esim. kaikulaitteille tai monitorointiin.
- Ryhmittelykytkimiä, joilla valitaan mihin väyliin (bus) signaalin halutaan kytkeytyvän.
- Soolokytkin (solo, PFL(pre fader listen)), jolla kyseisen kanavan signaalia voidaan kuunnella yksinään esimerkiksi kuulokkeilla. Kun soolokytkin on painettu, kytkeytyy joku mikserin tasomittareista, usein päälähdön (main) mittari näyttämään kuunnellun kanavan sisääntulotasoa.
- Liukusäädin (fader) kanavalta eteenpäin lähtevän signaalin tason säätämiseksi
- Mute-kytkin, jolla voidaan mykistää kanava haluttaessa.
- Panorointisäädin (pan) äänen paikan määrittämiseksi stereokuvassa.
- Digitaalimiksereissä lisäksi:
 - Kohinasalpa (gate, noise gate), jolla mykistetään säädettyä raja-arvoa (threshold) heikompi signaali.
 - Kompessor (compressor), jolla vaimennetaan säädetyn raja-arvon ylittäviä ääniä.
 - Limitteri (limiter), joka on itse asiassa kompressor, jonka kompressointisuhde on säädetty suuremmaksi kuin 20:1.

- Viive (delay) signaalin viivästämiseksi.

5.3.3 Lähtökanavat

Sisääntulokanavilta eteenpäin ohjattu ääni kulkee erilaisten lähtökanavien kautta mikserin fyysisiin ulostuloihin (output), jotka voivat olla tyypiltään analogisia linjatasoisia tai digitaalisia. Lähtökanavissa voi olla mikserin merkistä ja mallista riippuen ekvalisointi-, kompressointi- ja viivästysominaisuuksia. Lisäksi lähtökanavissa on mittarit, jotka näyttävät lähtevän signaalin voimakkuuden.

Lähtökanavatyyppit ovat:

- Päälähtö (main out), jolla syötetään yleensä pääkaiuttimia tai matriisia.
- Ryhmälähdöt (group, bus) pääkaiuttimille ja matriisille menevän signaalin apusummien rakentamista varten.
- Aux-lähdöt (auxiliary send) efektilaitteiden, monitorien ja muiden omaa tasonsäätöä tarvitsevien kohteiden syöttämiseen. Aux-lähdöillä voidaan tehdä useita eri balanssisia miksauksia samoista sisääntulokanavista.
- Matriisilähdöt (matrix) kaiutinjärjestelmän syöttämiseen. Matriisilähtöjen toimintaa voi havainnollistaa ajattelemalla niitä ryhmä- tai päälähdöistä syötettävänä aux-lähtöinä.

Käyttötarkoitukset ovat ohjeellisia, ja kaikkia erityyppisiä lähtökanavia voidaan ja tulee kin hyödyntää tuotannon tarpeen ja omien työtapojen mukaan.

5.3.4 VCA-ryhmät

VCA on lyhenne englannin kielen sanoista voltage controlled amplifier, joka tarkoittaa jänniteohjattua vahvistinta. Äänipöydissä tällä toiminnolla tarkoitetaan ns. VCA-ryhmiä. VCA-ryhmät ja niitä ohjaavat VCA-faderit poikkeavat ryhmälähdöistä täysin, sillä ne eivät ole väyliä eivätkä fyysisiä lähtöjä, vaan niillä ohjataan kussakin kanavassa olevaa jänniteohjattua vahvistinta. Tällöin voidaan esimerkiksi kokonaisen soitinryhmän äänenvoimakkuutta manipuloida yhdellä liukusäätimellä, vaikka yksittäiset kanavat on ryhmitelty eri lähtökanaviin. Digitaalimiksereissä käytetään muunnoksia samasta toiminnosta, mutta varsinaisia jänniteohjattuja vahvistimia ei luonnollisestikaan tarvita, koska signaali ei etene analogista reittiä, vaan kaikki muokkaus tapahtuu digitaalisesti.

Mute-ryhmät toimivat samalla periaatteella, mutta vaimennuksen sijasta niillä ohjataan mute-kytkimiä.

5.3.5 Kaiutus ja efektointi

Kolmiulotteisen äänikuvan luomiseksi sekä soinnin muokkaamiseksi halutaan ääneen yleensä lisätä taajuustoiston ja dynamiikan muokkaamisen ohella erilaisia efektejä, joita voidaan tuottaa siihen tarkoitetuilla efektilaitteilla (myös kaikulaite on yleisesti käytetty termi). Nämäkin ominaisuudet löytyvät tosin nykyään yleensä digitaalimiksereistä, eikä erillisiä laitteita välttämättä tarvita. Toisin on, jos halutaan taiteellisista syistä käyttää juuri tiettyä laitetta sen ominaissoinnin tai jonkin erikoisominaisuuden takia.



Kuvio 12. Lexicon 480L kaikulaite LARC kauko-ohjaimineen (<http://www.gearfordays.com>)

Kaikulaitteille syötetään haluttu signaali normaalisti mikserin aux-lähdöstä. Tällöin voidaan kunkin sisääntulokanavan ääntä ohjata haluttu määrä kullekin efektille, eikä jokaiselle kanavalle tarvita erillistä efektilaitetta, mikä olisikin laitteiden ja prosessointitehon haaskausta. Vastaavasti kaikulaitteelta tuleva efektoitu signaali palautetaan mikserin kanavaan tai stereoeffektien tapauksessa kahteen kanavaan, jolloin sitä voidaan miksata ja ryhmitellä kuin mitä tahansa muutakin äänilähdettä.

Esityskäytössä tärkeimmät efektit ovat:

- Kaiku (reverb), jolla jäljitellään lähtökohtaisesti akustisen tilan sointia. Yleistä on tosin myös vanhojen analogisten kaikulaitteiden, kuten levy- tai jousikaiun jäljitely.

- Viive (delay) on periaatteessa sama toiminto kuin digitaalimiksereiden lähtö- ja tulokanavissa oleva, mutta efektiikäytössä voidaan säätää paitsi viiveen pituutta, myös toistojen määrää, taajuusvastetta, moduloida viiveaikaa, ja jopa viiveen virettä. Myös niin sanottu tap tempo -toiminto on musiikkituotannoissa erittäin hyödyllinen. Tap tempolla tarkoitetaan toimintoa, jossa naputtamalla efektilaitteen tiettyä nappia vaikkapa musiikin neljäsosanuottien tahdissa, määritellään delay-ajaksi sama neljäsosanuotin kesto. Näin voidaan reagoida nopeasti ja vaivattomasti musiikin tempomuutoksiin.
- Äänen taajuuden muuttaminen (pitch shift), jolla voidaan manipuloida äänen virettä. Nykyään on saliaänentoistoonkin raivaamassa tietään studioissa jo pitkään käytetty automaattinen vireenkorjaus, jolla tarkoitetaan – toistaiseksi monofonisen – signaalin intonaation korjaamista ennalta määritellyn sävellajin tai skaalan mukaiseksi. Toisin sanoen, jos on tiedossa, että laulaja aikoo esittää laulun C-duurissa, voidaan intonaatiokorjaus asettaa sallimaan vain C-duurin äänet (C, D, E, F, G, A ja H) ja virittämään mahdolliset muut äänet lähimpään sallittuun äänenkorkeuteen. Jotta tämä korjaus saadaan kuulostamaan luonnolliselta, vaaditaan käyttäjältä tiettyä perehtyneisyyttä musiikin teorian perusteisiin sekä aiempaa kokemusta intonaatiokorjauksesta.

6 Mikrofonit

Mikrofonit ovat akustis-sähköisiä muuntimia eli laitteita, jotka kykenevät muuntamaan akustisen, ihmiskorvan kuultavissa olevan äänen ilman värähtelystä sähköiseksi signaaliksi – jännitteen vaihteluiksi – jota voimme siirtää, muokata ja toistaa eri äänijärjestelmillä. Mikrofonit ovatkin kaiuttimien ohella kriittisin osa äänentoistojärjestelmää – ne määrittävät millaista ääntä saamme käyttöömmme.

Esittävän taiteen parissa työskentelevät tarvitsevat mikrofoneja äänilähteinä lähinnä seuraavissa sovelluksissa:

- Äänittäminen
- Äänentoisto
- Erilaiset mittaukset

Sopivaa mikrofonia eri käyttötarkoituksiin valittaessa punnitaan yleensä ainakin seuraavia ominaisuuksia:

- Herkkyys
- Suuntakuvio
- Taajuusvaste
- Kyky kestää äänenpainetta säröytymättä
- Kohina
- Fyysinen kestävyys ja luotettavuus
- Osittain subjektiivinenkin käsitys soinnista

Nämä ominaisuudet vaihtelevat tuntuvasti eri tyyppisten mikrofoniin välillä.

6.1 Sähköinen toimintaperiaate

Mikrofonit voidaan jakaa sähköisen toimintaperiaatteen mukaan seuraaviin ryhmiin

6.1.1 Dynaamiset mikrofonit

Dynaamisten mikrofoniin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Mikrofonin kalvo liikuttaa pientä johtokelaa magneettikentässä. Tällöin kelaan indusoituu äänen voimakkuuden ja taajuuden mukainen jännite – mikrofonitasoinen audiosignaali.



Kuvio 13. Shure SM57 ja SM58 dynaamiset mikrofonit (www.shure.com)

Dynaamiset mikrofonit ovat yksinkertaisen toimintaperiaatteensa takia varsin kestäviä ja edullisia, mitkä ominaisuudet ovatkin tehneet niistä kaikkein yleisimmän mikrofonityypin erityisesti esityskäytössä.

Dynaamisen mikrofonin alalajina mainittakoon nauhamikrofoni, jota monet pitävät pehmeän sointinsa takia ihanteellisena studiomikrofonina. Nauhamikrofoni on kuitenkin herkästi rikkoutuvan rakenteensa takia harvinainen esityskäytössä.

6.1.2 Kondensaattorimikrofonit

Kondensaattorimikrofoneissa audiosignaali muodostuu mikrofonin kalvon ja sen takana olevan levyn välisen kapasitanssin vaihtelusta. Toimintaperiaatteensa takia kondensaattorimikrofoni tarvitsee aina käyttöjännitteen – yleisimmin 48 voltin suuruisen ns. phantom-jännitteen – joka syötetään mikrofonietauvahvistimelta mikrofoniakaapelia pitkin. Käyttäjän ei sinänsä juuri tarvitse huolehtia käyttöjännitteestä, yleisin virhe kondensaattorimikrofoneja käytettäessä lienee se, ettei phantom-jännitettä muisteta kytkeä päälle!



Kuvio 14. Neumann U87 kondensaattorimikrofoni (www.neumann.com)

Kondensaattorimikrofonit reagoivat akustiseen ääneen erityisen tarkasti, koska värähtelevän ilman tarvitsee liikuttaa ainoastaan ohutta kalvoa, toisin kuin dynaamisessa mikrofonissa, jossa kalvon liikettä jarruttaa raskaahko kela.

Hyvän äänenlaatunsa takia kondensaattorimikrofonit ovat tavallisia äänityskäytössä. Äänentoistokäytössä ne ovat oivallisia, kun tarvitaan suoraa taajuusvastetta, suurta

herkkyyttä ja hyvää transienttitoistoa. Vaikkapa kamariorkesterin äänentoistossa kondensaattorimikrofoni on luonnollinen valinta.

6.1.3 Elektreettimikrofonit

Elektreettimikrofonit muistuttavat toimintaperiaatteltaan kondensaattorimikrofonia. Niiden tärkeimpänä ominaisuutena käytön kannalta on mainittava hyvän äänenlaadun ohella pieni koko. Niinpä useimmat laadukkaat panta- ja nappimikrofonit ovatkin juuri elektreettimikrofoneja.

6.1.4 Pietsomikrofonit

Pietsomikrofonien toiminta perustuu pietsokiteen kokoonpuristumisesta syntyvään jännitteeseen. Pietsomikrofoneja käytetään lähinnä instrumenttien kontaktimikrofoneina.

6.1.5 Hiilimikrofonit

Hiilimikrofonit ovat kaikkein vanhimpia mikrofoneja, joissa kalvon liike puristaa hiilirakeita toisiaan vasten. Tällöin näiden välinen muuttuva resistanssi ohjaa audiosignaalia. Hiilimikrofoneja ei kuitenkaan enää juuri käytetä.

6.2 Mikrofonien suuntakuviot

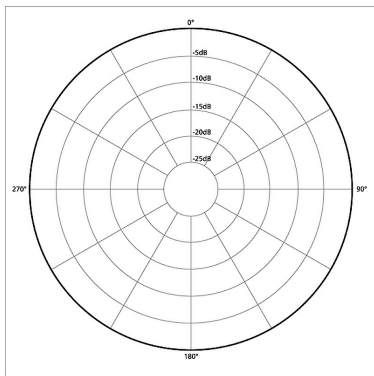
Suuntakuvio kertoo, miten mikrofoni reagoi eri suunnista tuleviin ääniin. Tämä ominaisuus on ehdottoman tärkeä, kun halutaan synnyttää erottelua eri äänilähteiden, kuten akustisen tilan heijastusten ja suoran äänen välille. Monissa mikrofoneissa suuntakuvioita voidaan vaihtaa käyttötilanteen mukaan.

6.2.1 Pallokuvioiset eli omnidirektionaaliset mikrofonit

Pallokuvioinen mikrofoni vastaanottaa teoriassa ääntä kaikista suunnista samalla herkkyydellä. Käytännössä mikrofoniin rakenne usein aiheuttaa tiettyä suuntaavuutta korkeilla taajuuksilla, jonka takia pallomikrofonitkin tulee suunnata äänilähteeseen. Pallo-

mikrofonit ovat yleensä taajuusvasteeltaan varsin neutraaleja ja toistavat äänen erittäin täsmällisesti.

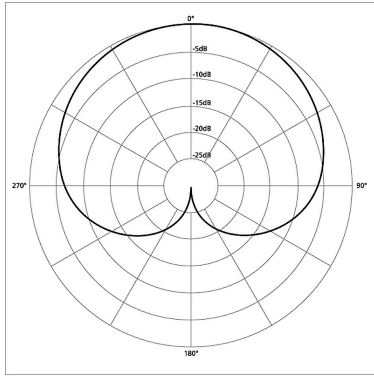
Äänentoistokäytössä pallomikrofonien käyttö on melko harvinaista, koska takaisinkytkennän (engl feedback) välttämistä haittaa se, ettei suuntakuviolla voida korostaa tiettyä äänilähdettä. Tähän sääntöön on kuitenkin poikkeuksia, joista yleisin on erilaiset nappi- ja pantamikrofonit, jotka ovat usein omneja. Yleensäkin voidaan sanoa, että pallokuvion käyttöä vältellään usein turhankin takia, sillä myös kardioidimikrofonit variaatioineen toimivat lähes kuin pallot matalilla alle 500 Hz taajuuksilla, joilla feedback-ongelmat usein esiintyvät. Monesti kriittisintä on mikrofonin sijoittaminen lähelle äänilähdettä, jolloin haluttu ääni saavuttaa mikrofonin voimakkaampana kuin ympäristön äänet. Lähitekniikoissa pallokuvioinen mikrofoni toimiikin loistavasti proximity-efektin puuttuessa.



Kuvio 15. Pallosuuntakuvio (www.harmonycentral.com)

6.2.2 Herttakuvioiset eli kardioidimikrofonit

Hertta on äänentoistokäytössä yleisin suuntakuvio. Sen etuna on löyhästi sydämenmuotoinen suuntakuvio, joka erityisesti korkeilla taajuuksilla vaimentaa voimakkaasti mikrofonin takaa ja sivuilta tulevia ääniä. Esimerkiksi jo vuosikymmeniä maailmanlaajuisesta suosiosta nauttineet Shure SM58 ja SM57 -mikrofonit ovat suuntakuvioltaan kardioidieja.

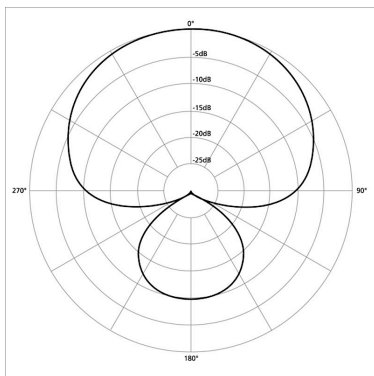


Kuvio 16. Herttasuuntakuvio (www.harmonycentral.com)

6.2.3 Super- ja hyperherttakuvioiset eli super- ja hyperkardioidimikrofonit

Super- ja hyperherttat ovat kardioidin kapeampisuuntakuvioisia muunnoksia.

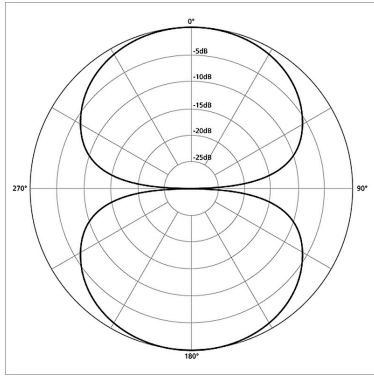
Kulmamonitorikaiuttimien kanssa super- ja hyperherttat ovat arvaamaton yhdistelmä, koska myös mikrofonin takana on äänelle herkkä pienempi suuntakuvio. Toisin sanoen superherttaa ei kannata laittaa telineeseen osoittamaan suoraan poispäin monitorikaiuttimesta, jos haluaa välttää akustiselta takaisinkytkennältä, "kierrolta".



Kuvio 17. Hyperherttasuuntakuvio (www.harmonycentral.com)

6.2.4 Kahdeksikkokuvioiset mikrofonit

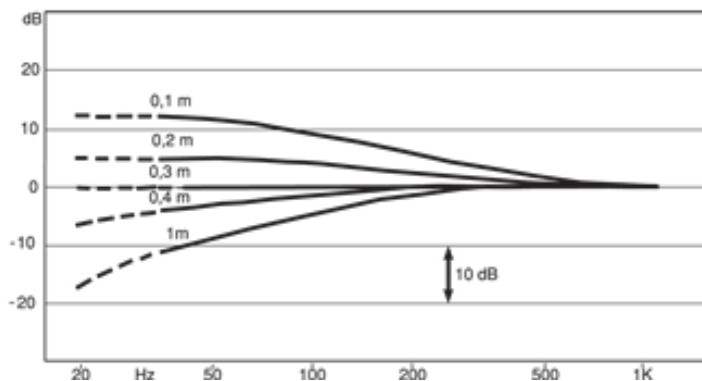
Kahdeksikkokuvioiset mikrofonit vaimentavat voimakkaasti sivuilta tulevaa ääntä. Ne erottaa muista mikrofoneista erityisesti se, että niiden suuntakuvio on käytännössä taajuudesta riippumaton, eli on olemassa myös matalilla taajuuksilla. Nauhamikrofonit ovat yleensä kahdeksikkoja.



Kuvio 18. Kahdeksikkokuvio (www.harmonycentral.com)

6.3 Proximity-efekti

Suuntakuvoisilla mikrofoneilla tapahtuu mikrofonia lähellä olevilla äänilähteillä proximity-efektiksi kutsuttu ilmiö, joka tarkoittaa lähinnä matalien taajuuksien korostumista sitä enemmän mitä lähempänä mikrofonin kalvoa äänilähde on.



Kuvio 19. Proximity-efekti dpa 4011 kardioidimikrofonilla. Etäisyys mikrofonin ja äänilähteen välillä merkitty metreinä. (www.dpa.com)

Monet taitavat laulusolistit osaavat käyttää tätä ilmiötä hyväkseen ja laajentavat näin ilmaisuaan säätämällä mikrofonin paikkaa laulaessaan. Vastaavasti harjaantumaton laulaja tai puhuja voi tehdä esiintymisellensä paljon haittaa liikuttelemalla kardioidimikrofonia kädessään sattumanvaraisesti. Ääniteknikolle proximity-efekti on useimmiten taakka, koska eri etäisyydeltä samaan mikrofoniin tulevat äänet toistuvat eri taajuusvasteella.

6.4 Tuulisuojat ja pop-filtterit

Mikrofonit on syytä suojata ilmavirroilta kuten tuulelta ja puhujan tai laulajan suoralta puhaltelulta, sillä nämä aiheuttavat signaalin säröytymistä, riippumatta varsinaisesta äänenpaineesta. Monissa solistimikrofoneissa on onneksi sisäänrakennettu tuulisuoja.



Kuvio 20. DPA mikrofoni pop filterillä ja Neumann mikrofoni tuulisuojalla (www.dpa.com, www.neumann.com)

6.5 Langattomat mikrofonit

Langattomia mikrofoneja käytetään eritoten teatteri ja kuvatuotannoissa laulajien ja näyttelijöiden äänen taltiointiin ja vahvistamiseen. Niiden tärkein ominaisuus on nimensä mukaisesti se, että ne vapauttavat äänilähteen liikkumaan vapaasti käytetyn järjestelmän toiminta-alueella. Koska nykyaikaiset langattomien mikrofoniin lähettimet ja mikrofoni-kapselit ovat hyvin pienikokoisia, voidaan niitä käyttää myös silloin, kun perinteisistä mikrofoneista kaapeleineen seuraisi vakava visuaalinen haitta. Myös vaikkapa näyttämöorkestereiden ja muiden liikkuvien kohteiden ääntä on toisinaan tarpeen siirtää langattomasti.



Kuvio 21. Shure UHF-r langaton käsikrofoni, nappi- tai pantamikrofonin lähetin ja kaksikanavainen vastaanotin (www.shure.com)

6.5.1 Langattomat mikrofonijärjestelmät

Yleisimmät ammattikäytössä olevat järjestelmät ovat analogisia kahden antennin signaalia yhdistäviä diversity-järjestelmiä, jotka toimivat Suomessa 790–822 MHz, sekä 854–862 MHz taajuusalueella.

Digitaaliset järjestelmät ovat kuitenkin tulossa markkinoille ja tätä kirjoitettaessa ainakin Shure valmistaa jo digitaalisia langattomia.

Taulukko 1. Radiomikrofonien taajuudet Suomessa (Viestintävirasto 2013)

174–230 MHz	Käyttö luvanvaraista
470–694 MHz	Käyttö luvanvaraista
694–789 MHz	Käyttö luvanvaraista. Käytettävissä enintään 31.12.2020 asti
790–822 MHz	Käyttö päättyy 31.12.2013
854–862 MHz	Käyttö päättyy 31.12.2013
1785–1800 MHz	Käyttö luvanvaraista
823–832 MHz	Käyttö luvasta vapaata
863–865 MHz	Käyttö luvasta vapaata

Koko Euroopan alueella on meneillään suuri radiotaajuuksien uudelleenjärjestely, jonka seurauksena nykyisten taajuuksien käyttö esitysäänitekniikassa päättyy Suomessa 31.12.2013. Tähän mennessä käyttäjien on joko korvattava vanha kalusto uudella tai

muutettava vanhat laitteet toimimaan uusilla taajuuksilla. Läheskään kaikki järjestelmät eivät ole muutettavissa, joten uudistuksesta seuraa suuria kustannuksia monille käyttäjille.

6.5.2 Nappi- , panta- ja käsimikrofonit

Yleensä samalla vastaanottimella voidaan käyttötilanteesta riippuen vastaanottaa signaalia joko käsimikrofoni-lähetinyhdistelmästä tai vyöasemälähetimestä.



Kuvio 22. Pantamikrofoni näyttelijällä (www.dpa.com)

6.5.3 Ongelmakohtat

Langattomien mikrofoniin käyttö ei ole aivan ongelmaton, ja yleensä ainakin suurissa tuotannoissa on tapana, että langattomia mikrofoneja käyttämään ja valvomaan varataan erillinen henkilö. Arkisia haasteita ovat mm. paristojen tai akkujen varauksen loppuminen, radiohäiriöt, vaurioituneet mikrofoni-kapselit ja niiden kaapelit sekä mikrofoni-kapseleiden tukkeutuminen hiestä ja meikeistä.

7 Digitaaliääni ja sen rajapinnat

1980-luvulle saakka ääntä siirrettiin, taltioitiin ja muokattiin analogisesti, aaltoliikkeen energiaa muodosta toiseen muuttamalla. Esimerkiksi analogiselle avokelanauhalle tallennettaessa ilman aaltoliike muutetaan sähköiseksi aaltoliikkeeksi, joka puolestaan taltioidaan magneettinauhalle samaa ketjua pitkin vastakkaiseen suuntaan myöhemmin toistettavaksi. Sittemmin kaikki muut ketjun kohdat paitsi ilman värähtelyn muuttaminen sähköiseksi mikrofonin avulla ja sähköisen värähtelyn muuttaminen ilman värähtelyksi kaiuttimella on voitu muuttaa digitaaliseen muotoon, jossa äänen aaltoliikettä kuvataan lukusarjalla.

7.1 Pulssikoodimodulaatio

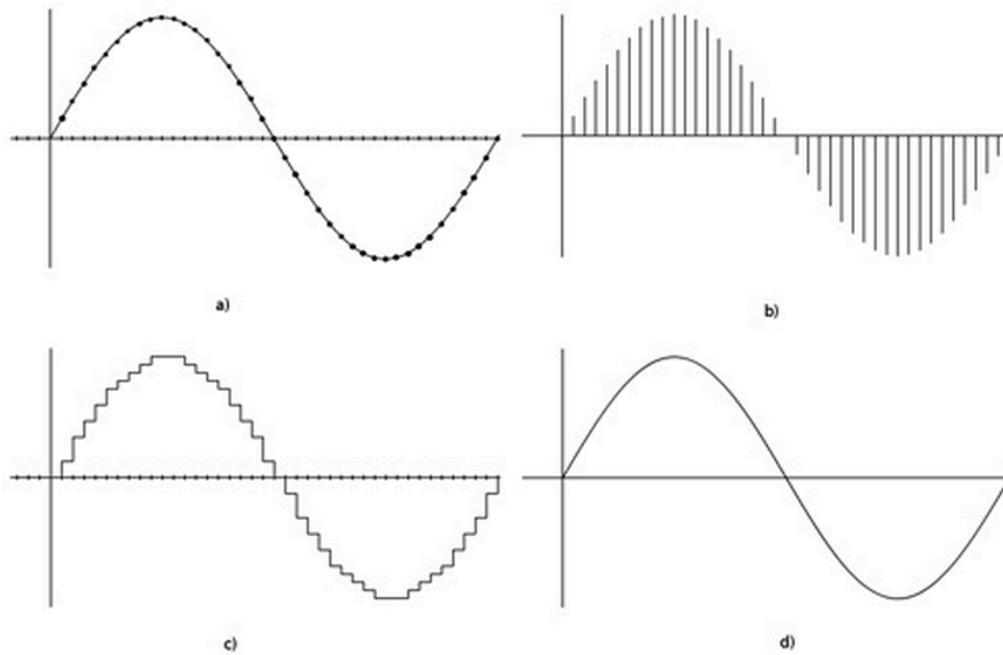
PCM eli lineaarinen pulssikoodimodulaatio on yleisin tapa digitoida ääntä. Esimerkiksi CD-levyllä ja Wav-tiedostoissa ääni on tässä muodossa.

7.1.1 A/D- ja D/A-muunnos

Kun ääntä muutetaan digitaaliseen muotoon tapahtuu analogi-digitaalimuunnos eli A/D-muunnos ja vastaavasti digitaalisesta analogiseen muotoon muutettaessa D/A-muunnos. Tällöin analogisesta signaalista otetaan näytteitä tietyllä näytteenottotaajuudella ja resoluutiolla.

7.1.2 Näytteenottotaajuus ja resoluutio

Yleisimmät näytteenottotaajuudet ovat karkeasti jaettuna äänituotannossa 44.1 kHz ja kuvaäänituotannossa 48 kHz. Syynä tähän jakoon on eri tallentimista periytyvät standardit, ei tekninen paremmuus. CD-levyn näytteenottotaajuus on 44.1 kHz, mikä tarkoittaa, että äänestä otetaan näyte 44100 kertaa sekunnissa.



Kuvio 23. A/D- ja D/A-muunnos. Kohdassa a) kuvataan analogisen signaalin aaltomuotoa jossa koordinaatiston pystyakselilla on amplitudi ja vaaka-akselilla aika. Pisteet kuvaavat näytteenottotaajuutta. Kohdassa b) pystyviivat kuvaavat samasta aaltomuodosta otettuja digitaalisia näytteitä. Kohdassa c) on puolestaan digitaalinen signaali muunnettuna täsmällisesti vastaavaksi analogiseksi signaaliksi. Näytteenoton tarkkuus näkyy korkeataajuisena särönä signaalissa. Kohdassa d) on analogisesta signaalista alipäästösuodatettu kuuloalueen yläpuoliset äänet pois ja aaltomuoto vastaa nyt kohdan a) alkuperäistä analogista aaltomuotoa. (Kuva: Petteri Laukkanen)

Yleisin bittiresoluutio on CD-levylläkin käytetty 16 bittiä. Bittiresoluutio määrittää kuinka pienin välein äänisignaalin amplitudin (värähtelyn voimakkuuden) vaihtelut mitataan kussakin muunnoksessa näytteessä. 16-bittinen resoluutio tarkoittaa äänen amplitudin määrittämistä 2 potenssiin 16 eli 65536 eri numeroarvolla. (Ks. esim. Leonard 2001) Myös 24 bitin resoluutiota käytetään toisinaan esimerkiksi akustista musiikkia tallennettaessa, kun halutaan varmistua, ettei tallennettavan äänen suuresta dynamiikasta ja äänitastasoista tarvitse huolehtia. Äänen prosessoinnissa halutaan toisinaan käyttää 24 bittiäkin suurempia resoluutiota. Myös monet äänipöytävalmistajat käyttävät A/D-muunnoksissa suurta resoluutiota. Tällä taataan myös kanavaetuasteita väärin käyttäville henkilöille virheetön A/D-muunnos.

7.2 Virheenkorjaus

Koska digitaalisessa tallennuksessa käsiteltävän tiedon määrä on varsin mittava, aiheutuu taltioinnissa väkisinkin tietty määrä virheitä. Tätä varten on kehitetty virheenkorjausjärjestelmiä, ja CD-levynkin datavirrasta neljäsosa on virheenkorjauksen tarvitsemaa tietoa. Jos virheitä on niin paljon, virheenkorjaus ei selviä niistä, se mykistää toiston. Näin välttyään yleensä kuulemasta satunnaista digitaalista kohinaa naarmuuntu-neelta CD-levyltä tai vastaavalta.

7.3 Pakkaaminen

Ääntä kuten muutakin dataa voidaan pakata, jotta tallentaminen veisi vähemmän tilaa ja tiedon siirtäminen olisi nopeampaa. Ylivoimaisesti yleisin äänenpakkausmenetelmä on mp3 eli MPEG-1 audio layer 3, joka on tyypiltään häviöllinen, eli äänen laatu kärsii pakkaamisesta. MP3-tiedoston äänenlaatu on kuitenkin verrannollinen sen bittinopeuteen joka vaihtelee välillä 32 kbit/s ja 320 kbit/s. Suurimmalla bittinopeudella tehty MP3-ääni onkin jo varsin hyvälaatuista, ja sitä käytetään mm. radiomainosten toimittamiseen kanaville ja musiikin jakamisessa maksullisessa Spotify Premium -palvelussa.

7.4 Synkronointi

Kun halutaan siirtää ääntä digitaalisesti eri laitteiden välillä on niiden sanakellot (word clock) synkronoitava keskenään. Tällöin lähettävän ja vastaanottavan laitteen pulssikoodimodulaation näytteenotto tapahtuu yhtäaikaaisesti. Synkronoinnin puuttuminen tai epäonnistuminen kuullaan yleensä satunnaisina napsahduksina äänessä.



Kuvio 24. Word clock - ja audioliitäntöjä MOTU 896 -laitteen takapaneelissa (Kuva: Petteri Laukkanen)

Synkronointi tapahtuu joko digitaaliaudiosignaalin avulla, jolloin tahdistuksen lähteeksi vastaanottavassa laitteessa määritellään signaalin sisääntulo tai erillisellä word clock -signaalilla, jota siirretään BNC-liittimin varustetulla koaksiaalikaapelilla.

7.5 Digitaaliäänen rajapinnat

Digitaaliäänen siirrossa käytetään lähinnä seuraavia standardoituja rajapintoja:

- AES/EBU (Nykyään myös AES3). Käytetään stereoäänen siirtämiseen balansoitua linjaa pitkin. XLR-liitin.
- S/PDIF (Kuluttajaversio edellisestä). Stereosiirto optisella kaapelilla tai balansimattomalla linjalla RCA-liittimin.
- ADAT (ADAT lightpipe). Kahdeksan äänikanavan yhtäaikaista siirtoa optisella kaapelilla.
- MADI (AES10). 64-kanavainen siirto 75 ohmista koaksiaalikaapelia tai optista kaapelia pitkin.

7.6 Äänen siirto tietoverkoissa

Ääntä on mahdollista siirtää myös osoitteellisissa tietoverkoissa, kuten IP (internet protocol) -verkoissa. Tällaisen siirron etuna on mm. valtava kapasiteetti ja signaalin lähes rajoittamaton reititys. Esimerkiksi Audinate ilmoittaa, että sen Dante-järjestelmä siirtää ja matrisoi 512 kanavaa 24-bittistä digitaaliääntä reaaliaikaisesti yhdellä gigabitin ethernet-yhteydellä, viiveaikojen ollessa mikrosekuntiluokkaa eli merkityksettömiä. Tulevaisuudessa tullaankin todennäköisesti siirtymään lähes yksinomaan tällaiseen siirtoon ja reititykseen, ainakin suurten kanavamäärien ollessa kyseessä.

8 Kaapelointi

8.1 Mikrofon- ja linjakaapelit

Äänikaapeloinnin perustana voidaan pitää XLR-liittimin kytkettävää balansoitua mikrofoniinjaa. Sitä pitkin voidaan siirtää luotettavasti pitkiä matkoja analogisia mikrofoni- ja linjatasoisia audiosignaaleja ja lisäksi digitaalista AES/EBU-signaalia.

Jotta 15 kHz:n taajuudella vaimennus ei ylitä 3 dB:ä, saa dynaamista mikrofonia (impedanssi 150 ohmia) käytettäessä linjan pituus olla enintään 300 metriä ja kondensaattorimikrofonia (impedanssi 50 ohmia) käytettäessä enintään 600 metriä JAMAK-kaapelia käytettäessä. (Haaranen ym. 2004, 173)

Varsinaisen AES/EBU-kaapelin impedanssi on eri kuin mikrofoniaapelin, mutta kaapelin pituuden ollessa kymmeniä metrejä tai alle, tällä ei ole käytännön merkitystä.



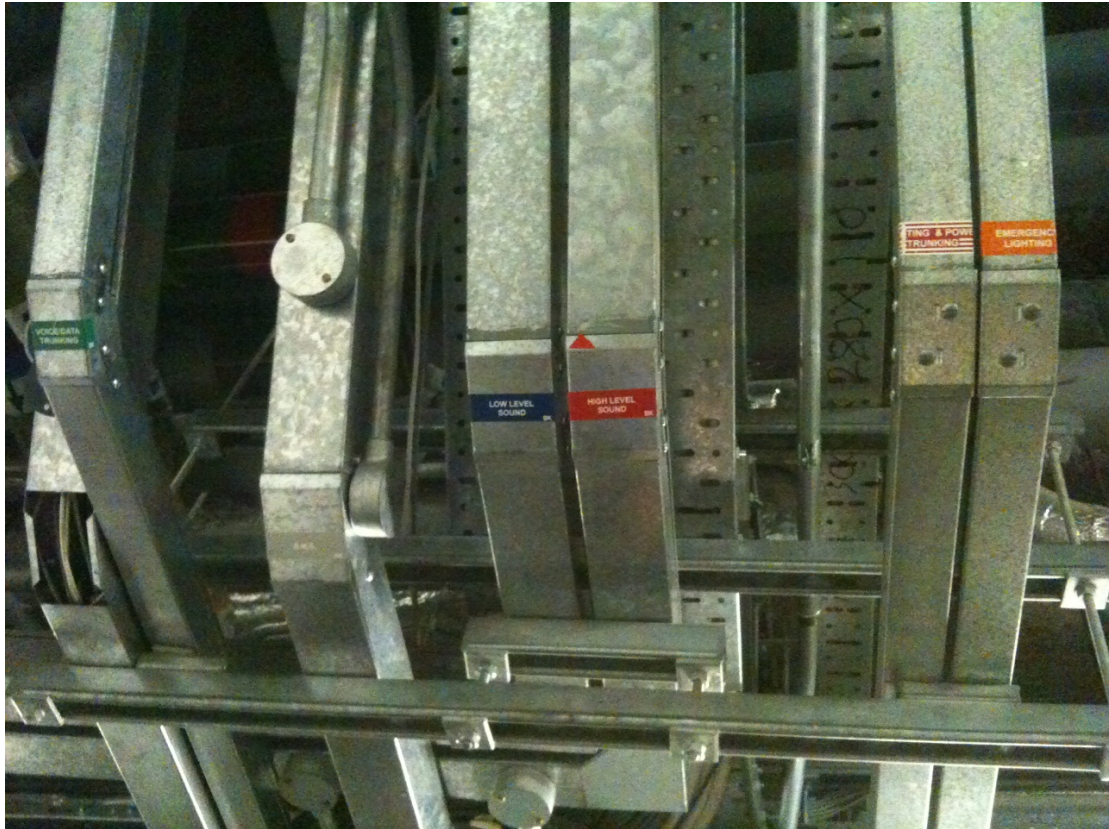
Kuvio 25. Balansoitu mikrofoniaapeli "mikkihiuha" (www.procosound.com)

Balansoinnilla tarkoitetaan signaalin kuljettamista kaapelin sisällä kahta identtistä johdinta pitkin. Myös mahdolliset häiriöjännitteet indusoituvat kumpaankin johtimeen identtisinä. Kun hyötysignaali vastaanotetaan näiden johtimien jännitteiden erotuksesta, jäävät identtiset häiriöt pois kuin vähennyslaskun tuloksena.

8.2 Häiriöt ja niiden välttäminen

8.2.1 Indusoituvat häiriöt

Induktiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä fysikaalista ilmiötä, jossa sähkökentässä olevaan metalliesineeseen indusoituu jännite. Koska äänen aaltoliikettä välitetään sähköisissä kaapeleissa jännitevaihteluina, aiheuttaa kaapeliin indusoituva häiriöjännite myös kuuluvan häiriön siirrettävään ääneen, jos häiriö on kuuluvan äänen taajuudella (n. 20 Hz–20 kHz).



Kuvio 26. Lontoon Covent Gardenin Royal Opera Housessa ei jätetä mitään sattuman varaan. Sähkö- ja signaalikaapelit kulkevat omia teräksisiä reittejään. (Kuva: Petteri Laukkanen)

Yleisimmät induktiivisen häiriön lähteet ovat esitysvalaistuksen tyristorihimmennyksen aiheuttamat sähköverkon ilmiöt ja jossain määrin telekaapelointi. Induktiivisilta häiriöiltä voidaan välttyä joko valitsemalla audiokaapeleiden reitit siten, että ne eivät kohtaa eivätkä varsinkaan kulje rinnakkain muiden kaapeleiden kanssa tai suojaamalla kaapelit metallikouruihin tai vastaaviin rakenteisiin mikä on erittäin kallista ja työlästä.

8.2.2 Maadoitusperäiset häiriöt

Toinen yleinen häiriötyyppi on erilaiset vikavirrat, joita syntyy kun toisiinsa kytkettyjen äänilaitteiden välillä vallitsee jännite-ero. Kahden eri maapotentiaalissa olevan laitteen välille, yleensä signaalikaapelin maajohtimeen, syntyy vikavirta. Tällainen vikavirta kuuluu äänilaitteissa sähköverkon siirtotaajuuden mukaisesti 50 Hz taajuisena hurinana tai sen monikertana.

Jotta maajohtimien vikavirroilta säästyttäisiin, tulisi kaikkien saman järjestelmän osina toimivien laitteiden saada käyttöjännitteensä samalta ryhmäkeskukselta, tai jos ryhmäkeskuksia on useita, tulisi niiden saada syöttönsä samalta jakokeskukselta. Tällöin kaikkien laitteiden rungot näet maadoittuvat samaan keskukseen ja ovat näin muodoin samassa potentiaalissa eikä vikavirtoja synny.

Aina ei tätä ohjetta ole mahdollista noudattaa ja lisäksi esimerkiksi sähköverkon liian suuret maadoitusvastukset tai vinokuormitukset voivat aiheuttaa heilahteluita maapotentiaaleihin. Tällöin pyritään katkaisemaan signaalikaapeloinnin maajohdin. Tämä voidaan tehdä yksinkertaisimmin käyttämällä tätä varten tehtyjä johtoja tai laitteita joissa on kytkin maan katkaisemista varten, kuten D.I. bokseja tai erotusmuuntajia.

8.3 Audiosignaalin jako- ja sovituslaitteet

8.3.1 DI-boksi

(Direct injection box) on sisääntuloimpedanssiltaan megaohmiluokkaa ja siihen voidaan kytkeä melkein mikä tahansa balansoimaton äänilähde, kuten kosketinsoitin, sähköbasso tai DJ-laite. DI-boksi muuttaa signaalin balansoiduksi ja impedanssiltaan äänipöydän mikrofonisisääntulolle sopivaksi. DI-bokseissa on myös kytkin signaalijohdinten maadoituksen katkaisemista varten.



Kuvio 27. Lähes teollisuusstandardin aseman saavuttanut BSS AR-133 DI-boxi (www.bssaudio.com)

8.3.2 Signaaliuuntaja

Signaaliuuntajilla voidaan tehdä erilaisia impedanssi ym. sovituksia. Legendaarinen uuntajavalmistaja on ruotsalainen Lars Lundahl. Monien laatuäänilaitteiden sisään- ja ulostulot on toteutettu uuntajia käyttäen mm. häiriösuojauksen takaamiseksi vaativassakin käytössä.



Kuvio 28. Lars Lundahl signaaliuuntajia (www.lundahl.se)

8.3.3 Jakovahvistin

Jakovahvistimia eli splittereitä käytetään signaalin haaroittamiseksi useampaan käyttökohteeseen. Esimerkiksi näyttämöltä tuleva mikrofoni-signaali voidaan tuoda sivunäyttämöllä sijaitsevan jakovahvistimen mikrofoni-etuasteelle, josta se jaetaan balansoituna linjatasoisena signaalina saliäänipöydälle, monitoriäänipöydälle ja vaikkapa TV-ulkotuotantoauton tallentimelle.



Kuvio 29. Klark Teknik DN1248 8-kanavainen jakovahvistin. Jokainen sisääntulo on jaettu neljään balansoituun lähtöön. Lisäksi jokaista sisääntuloa voidaan kuunnella kuulokkeilla ja mitata kuten äänipöydän sisääntulokanavassa. (Kuva: Petteri Laukkanen)

8.4 Kaiutinkaapelit

Kaiutinkaapeleiden tyypillisin ominaisuus on riittävä neliömillimetreinä ilmoitettava poikkileikkauspinta-ala. Toisin sanoen kaapelin metallisten johtimien on oltava riittävän paksuja. Nyökkisääntönä voitaneen todeta, että kaiutinkaapelin poikkipinta-ala ei saa olla ainakaan alle 2,5 neliömillimetriä. Myös kaiutinkaapelien reitit tulisi suunnitella siten, että mahdollisimman lyhyet kaapelit riittävät. Liian ohuet kaapelit haaskaavat vahvistintehoa. 60-metrisessä 1,5 neliön kaiutinkaapelissa tapahtuu jo 3 dB häviö, joka tarkoittaa, että puolet päätevahvistimen tehosta kuluu kaiutinkaapelin lämmittämiseen (Ks. esim. Davies 1987). Lisäksi liian ohuen kaiutinkaapelin impedanssi aiheuttaa kaiuttimen impedanssin kanssa summautuessaan mm. vääristymiä taajuustoistossa.

8.5 Data- ja videokaapelit

Usein äänentoistolaitteisiin kytketään myös data- ja videokaapeleita. Näitä käytettäessä on syytä perehtyä erityisen tarkasti laitteiden käyttöohjeisiin, sillä samoja kaapeleita kuten käytetään useiden täysin toisistaan poikkeavien signaalien siirtoon. Yleisin datakaapeli on ehdottomasti CAT-kaapeli, jota käytetään ennen kaikkea ethernet-yhteyksien muodostamiseen. Yleisin ammattivideokaapeli taas on 75-ohminen koaksiaalikaapeli BNC-liittimin, jolla siirretään analogisia videosignaaleja ja digitaalisen SDI-videosignaalin eri versioita.

8.6 Induktiosilmukat ja muut avustetut kuuntelut

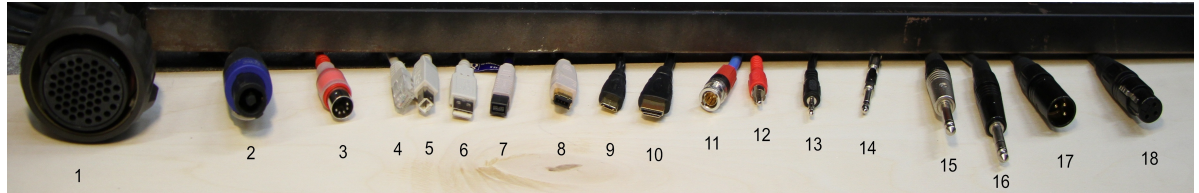
Niin kutsuttuja induktiosilmukoita on esittävän taiteen salien katsomoiden rakenteissa syöttämässä ääntä kuulolaitteille. Laite perustuu sopivaimpedanssisen kaapelilenkin ja päätevahvistimen yhdistelmään, jossa lenkki vastaa tavallaan kaiutinta. Vahvistimen soveltuvuus induktiosilmukan syöttämiseen on syytä varmistaa valmistajalta.

Markkinoilla on myös erilaisia radio- ja infrapunalähetystekniikkaan perustuvia avustettuja kuuntelujärjestelmiä. Induktiosilmukka lienee kuitenkin näistä yleisin.

Avustettu kuuntelujärjestelmä on osalle yleisöstä ainoa keino kuulla esityksen äänet, joten sitä ei pidä väheksyä. Myös laki edellyttää avustetun kuuntelujärjestelmän järjestämistä osana teattereiden esteettömyyttä.

8.7 Liitintyytit

Äänijärjestelmissä ja niiden käyttöympäristöissä tarvitaan lukuisia erilaisia liittimiä. Tässä on lueteltu niistä tärkeimmät:



Kuvio 30. Yleisimmät äänijärjestelmien liitintyytit numeroituna. (Kuva: Petteri Laukkanen)
Kuva 30 on suuremmassa koossa liitteenä (Liite 2).

1. Link-merkkinen 16-kanavainen audioliitin, jota käytetään mm. analogisissa moninapakaapeleissa.
2. Speakon kaiutinliitin.
3. MIDI-liitin on viimeinen ammattikäytössä yhä oleva DIN (Deutsche Industrienorm) -standardin mukaisia liittimiä. Käytetään 8-bittisen MIDI-ohjaustiedon lähettämiseen.
4. RJ-45-liitin. Käytetään ethernet-kaapeleissa.
5. USB-B-dataliitin.
6. USB-A-dataliitin.
7. Firewire 800 -dataliitin.
8. Firewire 400 -dataliitin.
9. Mini-HDMI-videoliitin.
10. HDMI-videoliitin.
11. BNC-liitin komposiittivideo-, SDI-, antenni- ym. kaapeleihin.
12. RCA-liitin balansoimattoman audion siirtämiseen.
13. 3.5 mm miniplugi. Yleinen mm. mobiililaitteissa.
14. NP3TT 4.4 mm (Bantam) ristikytkentäliitin.
15. Balansoimaton 6.3 mm plugi.
16. Balansoitu 6.3 mm plugi.
17. XLR-urosliitin. Syöttävä balansoidun audiolinjan standardiliitin.
18. XLR-naarasliitin. Vastaanottava balansoidun audiolinjan standardiliitin.

9 Äänen tallentaminen ja toistaminen

Teatteriesityksissä tarvitaan musiikkia ja tehosteääniä, jotka usein on tallennettu etukäteen. Esimerkiksi modernissa tanssiesityksessä kaikki kuultavat äänet saattavat olla ennalta taltioituja.

Äänen tallentaminen on viime vuosiin saakka tapahtunut ensin analogiselle ja myöhemmin digitaaliselle nauhalle. Ammattimaisessa esityskäytössä ääninauhalle ei enää ole käyttöä. Myös erilaiset magneto-optiset levyt kuten CD-R, ovat katoamassa. Musiikin tallentamisen ja toistamisen standardiksi on tullut tietokoneen muisti eri muodoissaan: kovalevyt, muistitikut jopa etäpalvelimet, joiden tekniikkaa ei käyttäjä välttämättä edes tunne.

9.1 Äänen tallentaminen ja muokkaaminen

Kovalevytallennukseen tarvitaan tietokoneen ja taltion lisäksi tallennusohjelma sekä laite joka muuttaa tallennettavan äänen ohjelman ymmärtämään muotoon. Näiden laitteiden – joita yleisesti kutsutaan niiden englanninkielisellä nimellä audio interface (ääni-rajapinta) – yhteensopivuus eri ohjelmistojen kanssa on melko hyvä mutta mm. markkinajohtaja Avid edellyttää Pro Tools -ohjelmansa järeissä versioissa yhtiön omien liitännäislaitteiden käyttöä. Pro Toolsin ohella muita suosittuja ohjelmistoja ovat Logic ja Cubase sekä jossain määrin Nuendo ja Pyramix.

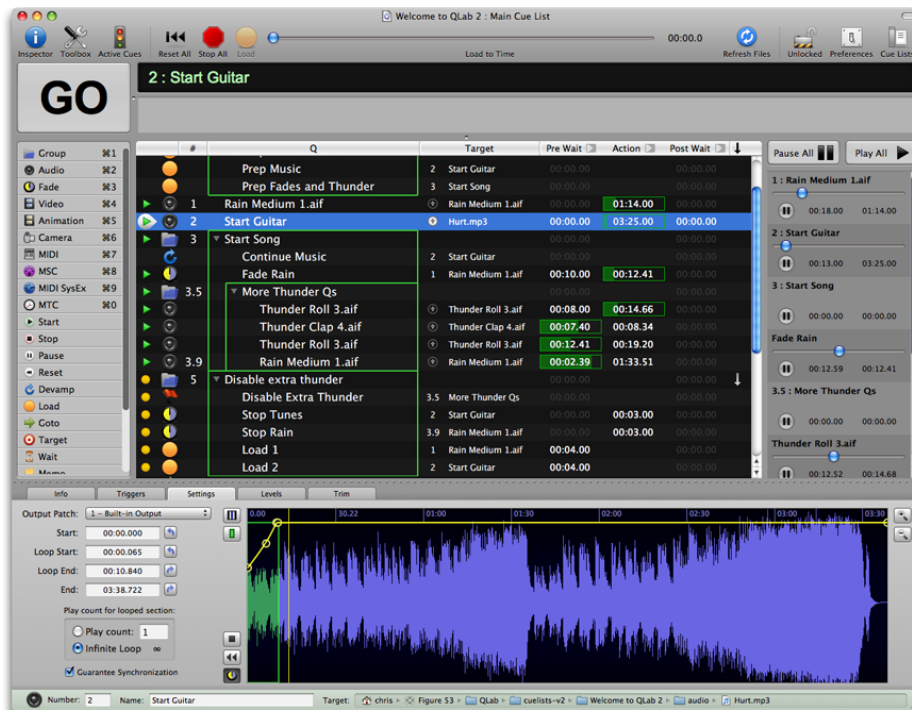


Kuvio 31. Näkymä Pro Tools -ohjelmasta (Kuva: Petteri Laukkanen)

Tallennusohjelmistot ovat kehittyneet täydellisiksi tuotantoympäristöiksi, eikä niiden lisäksi välttämättä tarvita äänitteiden tekemiseen muita laitteita kuin mikrofoneja ja kuu-
lokkeet.

9.2 Tallennetun äänen toisto

Äänen toistamiseen esityksissä on tarjolla vastaavia sovelluksia kuin taltiointiinkin. Tallennusohjelmat toimivat sinällään myös äänen toistamiseen, mutta niiden käyttövarmuus, kauko-ohjattavuus ja synkronoitavuus eivät ole sillä tasolla mitä esityskäytössä tarvitaan.



Qlab-ohjelma. (www.figure53.com)

Esitysäänentoistoon tarkoitetuissa ohjelmissa, kuten Qlabissa ja SFX:ssa, on mahdollista luoda yksityiskohtaisia ajolistoja, liipaista tapahtumia MIDI-viestillä tai verkon yli, muokata ääntä eri tavoin, lähettää aikakoodia tai show control -komentoja valopöydille ja muille laitteille, toistaa liikkuvaa kuvaa jne. Lisäksi niistä on pyritty tekemään mahdollisimman vakaita.

Huolimatta laitteiden luotettavuudesta, on esityksissä käytettävät tärkeät äänilähteet aina kahdennettava. Tehokkain tapa toteuttaa tämä on käyttää jatkuvasti rinnakkain

kahta täysin samanlaista järjestelmää. Näin toimittaessa esitys ei keskeydy vaikka toiselle laitteelle sattuisikin jotain. Kannattaa muistaa, että epätodennäköisinkin riski realisoituu joskus, kunhan toistoja on riittävä määrä.

9.3 Tekijänoikeudet

Käytettäessä tallennettua musiikkia on ehdottoman tärkeää kunnioittaa tekijänoikeuksia. Suomalaisten säveltäjien ja musiikintekijöiden edunvalvontajärjestö Teosto Ry:n kannattaa olla yhteydessä aina kun aiotaan esittää musiikkia julkisesti. Teostolta voi anoa lupaa musiikin käyttämiseen ja he myös välittävät korvauksen musiikin tekijöille. Musiikin käytöstä maksettavat korvaukset ovat verrannollisia lipputuloihin, joten pienissä tuotannoissa usein pelätään turhaan Teosto-maksun suuruutta. Teoston internet-sivuilla osoitteesta www.teosto.fi löytyy ajantasaiset ja täsmälliset ohjeet eri tilanteiden varalle.

10 Komentojärjestelmät

Jonkinlainen komentojärjestelmä tarvitaan aina kun esitetään jotain yleisölle. Se voi olla yksinkertaisimmillaan kädenheilautus, jolle on sovittu etukäteen merkitys tai laaja matriisikomentojärjestelmä kymmenine tai satoine päätelaitteineen, mutta ilman ei tulla toimeen.

10.1 Radiopuhelimet

Jos yhtäaikaista viestiliikennettä ei ole paljon, on radiopuhelin edullinen ja yksinkertainen viestiväline. **PMR446** (*Personal Mobile Radio*, 446 MHz) on yleiseurooppalainen standardi lupavapaille radiopuhelimille.

Näiden muutaman sadan euroin hintaisten laitteiden rajoituksena on kuitenkin niiden puoliduplex (half duplex) -toimintaperiaate. Tämä tarkoittaa, että kanava jolla viestitään on varattu yhden lähettävän laitteen käyttöön kerrallaan.



Kuvio 32. Motorola GP344 PMR466-standardin mukainen radiopuhelin. (Kuva: Petteri Laukkanen)

Toisin sanoen, jos kaksi käyttäjää painaa radioidensa lähetyskytkintä (tangent) samaan aikaan, ei kumpikaan kuule mitään, ja muut samaa taajuutta kuuntelevat parhaimmillaankin vain toisen lähettäjän puheen. Niinpä radiopuhelimien käyttö vaatii käyttäjien perehdyttämistä ja viestiliikenteen harjoittelua, sillä muutoin voi aiheutua pahimmillaan vaaratilanteita esim. näyttämön teknisiä vaihtoja valvottaessa.

10.2 Merkkivalot

Merkkivalot (cue light) ovat perinteinen ja varmatoiminen keino antaa komentoja näyttämötoiminnoista. Merkkivalojärjestelmien kaksi tärkeintä ominaisuutta ovat äänetön toiminta ja se, että viestin vastaanottaja ei tarvitse henkilökohtaista laitetta, eikä muuta käyttökoulutusta kuin tiedon siitä mitä hänen odotetaan tekevän kun tietty merkkivalo syttyy. Viestintä merkkivaloilla on luonnollisesti varsin rajoitettua, koska niillä voidaan käytännössä lähettää ainoastaan tekemisen hetkeä kuvaava komento ja parhaimmillaan kiittäminen sen vastaanottamisesta.

Merkkivalot ovat erityisen käteviä kun halutaan antaa suurelle joukolle ihmisiä selkeä komento jonkin tehtävän alkamisesta, kuten uuden kohtauksen alkamisesta ja esiintyjien näyttämölle tulosta teatterissa.



Kuvio 33. ASL TS 120 Cue light system -merkkivalojärjestelmän keskusyksikkö ja merkkivalo (Kuva: Petteri Laukkanen)

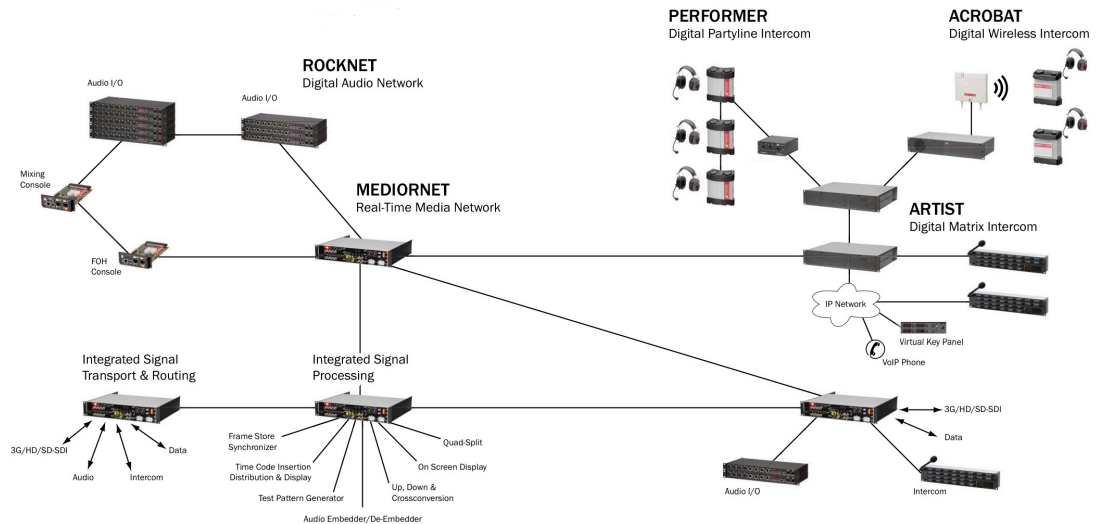
Merkkivalojen ohjaussignaalin välittämiseen käytetään useimmiten tavallisia mikrofonilinjoja, mikä tekee järjestelmän kytkemisestä yksinkertaista.

10.3 Sähköiset komentojärjestelmät (intercom system)

Varsinaiset komentojärjestelmät ovat laitteistoja, joiden avulla luodaan esityksen kannalta tärkeälle kommunikaatiolle yhtenäinen alusta. Nykyaikaiseen digitaaliseen komentojärjestelmään kuuluu viestiliikennettä ohjaavan keskusyksikön lisäksi:

- Kiinteitä komentopaneeleita, joita käytetään esim. teknisten operaattoreiden ohjaamoissa.
- Langallisia ja langattomia vyöasemia, joita käyttävät yksittäiset henkilöt, joiden on tarpeen liikkua ja kyetä kommunikoimaan eri paikoista käsin.
- Tukiasemia ja antenneja langattomien yhteyksien ylläpitämiseksi.
- VOIP (Voice Over Internet Protocol) -yhteyksiä päätelaitteille, jotka ovat liian suuren etäisyyden tai muun kaapeloinnin esteen takia vaikeasti saavutettavissa.
- Mahdollisuus kuva- ja äänisignaalin reitittämiseen samassa verkossa komento-yhteyksien kanssa.

Modernien järjestelmien osien väliset yhteydet muodostetaan yleensä CAT-tyyppisellä kaapelilla. Lisäksi on mahdollista käyttää tarpeen mukaan myös optisia kuituja ja jopa mikrofonilinjoja.



Kuvio 34. Riedel komentojärjestelmän periaatekuva (www.riedel.com)

Monilla näyttämöillä on yhä käytössä myös analogisia komentojärjestelmiä, jotka ovat täysin yhä käyttökelpoisia. Niissä yhteydet ovat enimmäkseen langallisia ja kytkentä tapahtuu mikrofonilinjoja käyttäen.



Kuvio 35. Clearcom-merkkinen analogisen komentojärjestelmän keskusyksikkö, vyöasema ja kuuloke-mikrofoniyhdistelmiä (headset). (Kuva: Petteri Laukkanen)

Kaikkia komentojärjestelmiä käytettäessä on jatkuvasti huolehdittava järjestelmän toimivuudesta, jottei näyttämöturvallisuus vaarannu. Erityisesti langattomien yhteyksien toimivuuteen ei pidä luottaa sokeasti.

11 Lopuksi

Olen työurani aikana kokenut ongelmalliseksi teatterin äänijärjestelmää koskevan kirjallisen tiedon vaikean saatavuuden ja pirstaloituneisuuden – oppi on seulottava esiin eri alojen kirjallisuudesta sekä lukuisista muista lähteistä, ja jäsenneltyjä kokonaisuuksia on vaikea löytää. Internetin myötä tarjolla olevan tiedon määrä on lisääntynyt, mutta usein lähteiden luotettavuutta on syytä epäillä. Perimätiedon muodossa suullisesti ja työssä oppimalla jaettavan osaamisen vaihteleva laatu on myös haaste tiedonjanoiselle. Pitkän kokemuksen omaavilta osaajilta on saatavissa korvaamatonta tietoa, mutta joskus kuulee kerrottavan tosiasioina myös täysin perättömiä väitteitä. Kokeneenkin ammattilaisen voi olla vaikea erottaa toisistaan käyttökelpoista tietoa ja disinformaatiota.

Monia työni osa-alueita olisi voitu käsitellä huomattavasti yksityiskohtaisemmin kuin nyt on tehty. Olen kuitenkin keskittynyt oman kokemukseni ja harkintani perusteella oleellimpaan.

Toivonkin, että opinnäytetyöni tarjoaa kiinnostuneille tiiviin kokonaiskuvan teatterin äänijärjestelmästä yksissä kansissa ja rohkaisee innokkaaseen, mutta kriittiseen tiedonhankintaan kiehtovasta ja alati kehittyvästä teatteriäänien maailmasta.

Lähteet

Davies Gary, Jones Ralph 1987. Yamaha Sound Reinforcement Handbook. 2. Painos. Milwaukee: Hal Leonard corporation

Haaranen Hannu, Holm Jan, Joenpolvi Mikko, Kuusisto Pekka, Leskinen Markku, Lähteenmäki Unto, Paukku Pekka, Ristilä Juha, Karppinen Eeva 2004. ST-kirja 19, Äänentoistojärjestelmät. Espoo: Sähköinfo Oy

Laaksonen Jukka 2006. Äänityön kivijalka. Helsinki: Idemco Oy

Leonard John A. 2001. Theatre Sound. London: A&C Black Limited

Nurmi Timo, Rekiaro Ilkka, Rekiaro Päivi 1994. Suomen kielen sanakirja. Helsinki: Gummerus

Viestintävirasto 2013. Langattomat mikrofonit ja kamerat. [Verkkosivu].
<<https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/radioluvat/langattomatmikrofonitjakamerat.htm>
|> (Luettu 1.4.2013)

Suomen kansallisoopperan päänäyttämön pohjakuva



Liite 2

Liitintyypit

